

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE JOINVILLE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL

LUCAS ARRIGONI IERVOLINO

**ESTUDO DE RESISTÊNCIA AO AVANÇO DE UMA EMBARCAÇÃO DE PLANEIO DE
26 PÉS: Abordagem computacional baseada em CFD**

Joinville, 2015

Lucas Arrigoni Iervolino

**Estudo De Resistência ao Avanço de uma Embarcação de Planeio de 26 Pés:
Abordagem Computacional Baseada em CFD**

Trabalho apresentado como requisito parcial
para obtenção do título de Engenheiro Naval,
no Curso de Engenharia Naval, na
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Thiago Pontin Tancredi PhD. Eng.

Joinville, 2015

Lucas Arrigoni Iervolino

**ESTUDO DE RESISTÊNCIA AO AVANÇO DE UMA EMBARCAÇÃO DE PLANEIO DE
26 PÉS: Abordagem computacional baseada em CFD**

Este trabalho foi julgado e aprovado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Naval pela comissão examinadora e pelo curso de graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Thiago Pontin Tancredi, PhD.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Thiago Pontin Tancredi, PhD.
Orientador

Prof. Lucas Weihmann, Dr. Eng.

Prof. Luiz Eduardo Bueno Minioli, Eng.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Paulo e Teresa, e minhas irmãs, Gabriela e Ana, pelo amor, ensinamentos e apoio incondicional durante todos os anos que antecederam este momento – vocês foram os melhores professores.

À minha namorada, Tamara, pela melhor companhia, maior paciência e amor ao longo desse ano.

Aos colegas e amigos que fizeram parte da minha vida universitária, pelos momentos inesquecíveis, lições e amizade – foram e continuam sendo uma segunda família.

Ao meu orientador, Thiago Pontin, pelo seu precioso tempo e sabedoria, compartilhados ao longo de inúmeras reuniões e conversas, mesmo à distância, para atingir o nível de excelência que almejamos.

Ao corpo docente e técnicos administrativos da UFSC Joinville, pelo trabalho incessante ao longo desses seis anos de campus, construindo uma universidade de referência.

Aos amigos e colegas da Petrobras, pela experiência única e por se esforçarem para proporcionar tempo e meios de aprendizado para me capacitar para este trabalho.

À equipe da CD-Adapco, por disponibilizar a licença do software STAR-CCM+, que tornou possível o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

A resistência ao avanço de embarcações de planeio é um fator limitante do seu desempenho e sua estimativa ainda depende de diversos métodos empíricos desenvolvidos ao longo do século XX. A melhor compreensão dos fatores que contribuem para o aumento da resistência ao avanço deste tipo de embarcação pode ser obtida através de simulações numéricas. Este trabalho visa o estudo da resistência ao avanço de cascos planantes através da comparação de métodos empíricos disponíveis na literatura e de simulações numéricas. A embarcação a ser estudada é uma lancha de pequeno porte (26 pés) cujo principal atributo de desempenho é a velocidade. O principal objetivo é reproduzir o fenômeno de planeio em ambiente de simulação, com a obtenção de resultados de resistência para diferentes valores de velocidade e variações paramétricas de LCG e Deslocamento da embarcação. Para tanto, este trabalho visa a aplicação da simulação numérica em *Computational Fluid Dynamics*, comparando com os resultados obtidos com o método semi-empírico proposto por Savitsky (1964). Os principais objetivos foram cumpridos e os resultados obtidos através da simulação numérica em CFD permitiram concluir a ocorrência do fenômeno de planeio plenamente desenvolvido. Estes, quando comparados com Savitsky, apresentam diferença substancial, que pode ser avaliada com a realização de testes experimentais. O trabalho realiza ainda um levantamento das possíveis fontes de incerteza presentes no estudo, visando aprimoramentos dos resultados e prevê realização de futuros trabalhos.

Palavras-Chave: Embarcações de Planeio, CFD, Savitsky, Resistência ao Avanço.

ABSTRACT

The drag resistance is a limiting factor in a high-speed craft's performance and its estimate is still dependent of several empirical methods discovered during the XX century. A better understanding of the variables that contribute to increasing the drag resistance can be obtained through numerical simulation. This paper aims to study the resistance in planning hulls calculated through empirical and numerical methods. The ship is characterized as a high-speed craft (26 ft) which main attribute is the speed. The main goal is to recreate the planning phenomenon in a simulation environment, obtaining resistance values for speed, and running parametric variations in LCG and Displacement. For such, this work uses numerical simulation in Computational Fluid Dynamics to obtain drag resistance and comparing numerical results with those obtained through the empirical method of Savitsky (1964). The main goals proposed by this study were successfully achieved, and the results obtained via CFD confirmed that the hull reached fully planing stage. When compared with Savitsky's resistance results, the conclusion is that they behave very similarly, but differ substantially in magnitude. The difference will be better evaluated when experimental results are performed. This study list the possible sources of uncertainties that may have affected the result's accuracy, aiming to improve the accuracy over the next suggested studies.

Keywords: High-Speed crafts, planing hull, CFD, Savitsky, Drag resistance.

LISTA DE SIGLAS

ABS – *American Bureau of Shipping*

CAD – *Computer Aided Design*

CAE – *Computer Aided Engineering*

CFD – *Computational Fluid Dynamics*

DOF – *Degree of Freedom*

DFBI – *Dynamic Fluid Body Interaction*

EDO – *Equações Diferenciais Ordinárias*

EDP – *Equações Diferenciais Parciais*

IMO – *International Maritime Organization*

SNAME – *Society of Naval Architects and Marine Engineers*

VOF – *Volume of Fluid*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Aplicações diversas de embarcações de alta velocidade.	6
Figura 2. Primeiros tanques de prova.	9
Figura 3. Componentes da Resistência ao Avanço.....	13
Figura 4. Distribuição de pressão em um escoamento ideal invíscido.	14
Figura 5. Padrão de ondas e esteira.	15
Figura 6. Resistência de embarcação planante (Curva 2) e deslocante (Curva 1).	17
Figura 7. Classificação das faixas de resistência ao avanço.....	17
Figura 8. Diagrama de relação entre potência e aceleração horizontal.	18
Figura 9. Vista anterior do formato 'V' do casco e ângulo de <i>deadrise</i>	19
Figura 10. Principais dimensões da embarcação.....	19
Figura 11 - Definições de embarcações rápidas segundo a IMO e a ABS.....	21
Figura 12 - Equilíbrio hidrostático de uma embarcação.	22
Figura 13. Força dinâmica de sustentação.....	23
Figura 14. Forças de sustentação atuando a 5 nós (esquerda) e 30 nós(direita).	24
Figura 15 - Simulação bifásica de embarcação de planeio em ANSYS FLUENT®.....	29
Figura 16. Fluxograma das etapas típicas de uma simulação em CFD.	30
Figura 17. Passos que formam a análise CFD.....	30
Figura 18. Malha de discretização de um domínio.	33
Figura 19. Sequência utilizada em CFD.....	35
Figura 20. Casco da embarcação utilizado como geometria base.	37
Figura 21. Geometria do casco com volume de controle definido.....	39
Figura 22. Volume de controle (água) após a operação de subtração do casco.....	40
Figura 23. Malha aplicada ao volume de controle estudado.	41
Figura 24. Refinamento da malha na região de contato com o casco.....	41
Figura 25. Modelo e Domínio importados e verificados no software de simulação.	42
Figura 26. Modelo em CAD do casco e ambiente de simulação.	44
Figura 27. Regiões e Condições de Contorno.....	47
Figura 28. Volume de controle discretizado.	50
Figura 29. Malha de sobreposição (<i>overset mesh</i>) com ângulo de <i>trim</i>	50

Figura 30. Curva de Resistência - Série 1.....	55
Figura 31. Curva de Potência - Série 1.	56
Figura 32. Curva de resistência - Série 2.	57
Figura 33. Curva de Potência - Série 2.	58
Figura 34. Movimento de <i>Pitch</i> da embarcação.	60
Figura 35. Movimento de <i>Heave</i> da embarcação.....	61
Figura 36. Comparação entre os resultados das simulações CFD e Savitsky.	62
Figura 37. Comparação entre CFD+ <i>DFBI</i> e Savitsky.....	63
Figura 38. Influência do deslocamento na resistência ao avanço.	64
Figura 39. Influência do LCG na estimativa da resistência.....	65
Figura 40. Influência do LCG no <i>trim</i> da embarcação.	65
Figura 41. Distribuição de pressão na superfície do casco.	66
Figura 42. Estado da malha da embarcação antes e depois de refino e reparos.....	67
Figura 43. Captura de divergência com submersão abrupta.....	68
Figura 44. Divergência com movimento excessivo de planeio da embarcação.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Modelos matemáticos do STAR-CCM+.....	45
Tabela 2. Dimensões de malhas aplicadas às regiões.	49
Tabela 3. Estudos de simulação em CFD realizados.....	54
Tabela 4. Resultado do cálculo de resistência das simulações da SÉRIE 1.....	55
Tabela 5. Valores de resistência das simulações da SÉRIE 2.....	57
Tabela 6. Captura de cenas das simulações.....	59
Tabela 7. Diferença entre resultados de simulação em CFD e Savitsky.....	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
1.1	Objetivo geral.....	8
1.2	Objetivos específicos	8
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2.1	Ensaaios Experimentais.....	9
2.2	Resistência ao Avanço.....	12
2.2.1	<i>Resistência de Fricção:.....</i>	<i>13</i>
2.2.2	<i>Resistência de Pressão Viscosa:.....</i>	<i>13</i>
2.2.3	<i>Resistência de Ondas:.....</i>	<i>14</i>
2.3	Embarcações de Planeio.....	16
2.4	Sustentação Dinâmica.....	22
2.5	Método empírico de Savitsky	24
2.6	Método CFD.....	26
2.6.1	<i>História.....</i>	<i>27</i>
2.6.2	<i>Introdução ao CFD</i>	<i>28</i>
2.6.3	<i>Equações Governantes</i>	<i>32</i>
2.6.4	<i>Discretização</i>	<i>33</i>
2.7	Método Analítico	34
3	METODOLOGIA.....	35
4	DESENVOLVIMENTO.....	37
4.1	Plataforma ANSYS.....	37
4.1.1	<i>Geometria.....</i>	<i>37</i>
4.1.2	<i>Malha.....</i>	<i>40</i>
4.1.3	<i>Configuração</i>	<i>42</i>

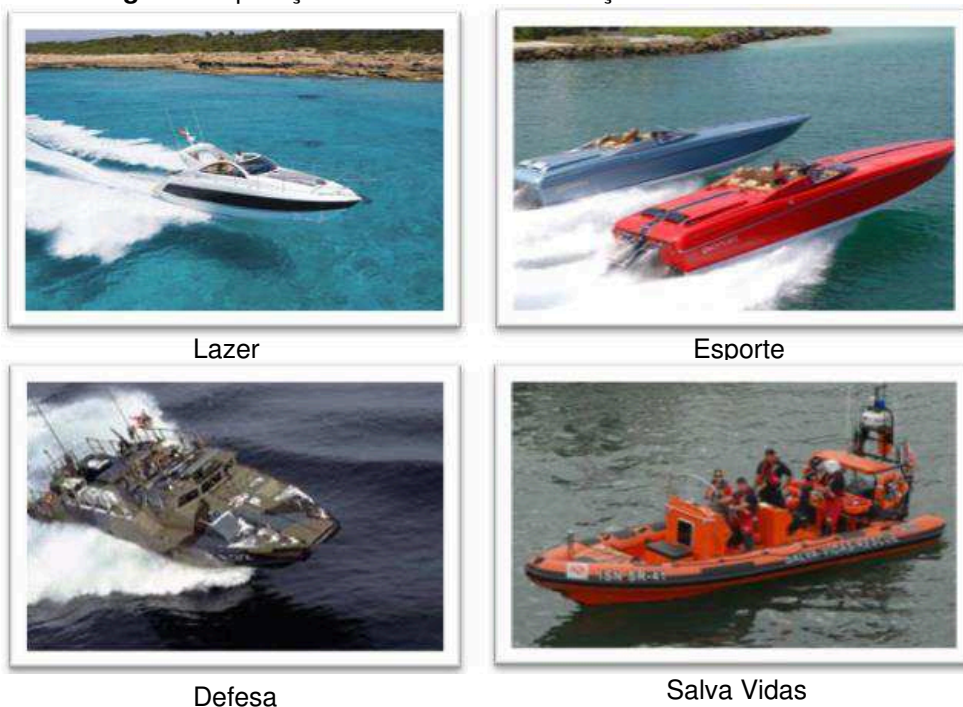
4.1.4	<i>Conclusões</i>	43
4.2	STAR CCM+	43
4.2.1	<i>Geometria</i>	43
4.2.2	<i>Parâmetros Físicos</i>	45
4.2.3	<i>Condições de Contorno</i>	47
4.2.4	<i>Malha</i>	48
4.2.5	<i>Movimento de Corpo Rígido</i>	51
4.2.6	<i>Solução</i>	52
5	RESULTADOS	54
5.1	Série 1 – Estudo Estático	54
5.2	Série 2 – Estudo Dinâmico: Movimento de Corpo Rígido (<i>DFBI</i>)	56
5.3	Comparação com resultados de Modelos Empíricos	61
5.4	Variações Paramétricas	64
5.5	Incertezas	66
6	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS	72
	APÊNDICE A – Método de Savitsky	76
	APÊNDICE B – Ambiente de simulação do STAR-CCM+	77
	APÊNDICE C – Resultados Complementares	79
	ANEXO A – Mapa de Zonas Sazonais	81

1 INTRODUÇÃO

As embarcações de planeio, como as lanchas, são meios de transporte de passageiros e cargas leves tendo a velocidade como seu principal atributo. Seu advento data do início do século XX, com nomes como o de Gar Wood, responsável por avanços no estudo de propulsão e de estabilidade de barcos de alta velocidade.

Embora caracterizadas tipicamente como embarcações de recreio, as lanchas servem um nicho maior, uma vez que possuem o diferencial de locomoção rápida se comparadas a embarcações deslocantes, podendo assim atuar como barcos de apoio a manobras, resgate, proteção, entre outros. Na Figura 1 encontram-se alguns exemplos de aplicação de barcos rápidos.

Figura 1. Aplicações diversas de embarcações de alta velocidade.



Fontes¹

¹ Da esquerda para a direita, de cima para baixo: <http://fotosdebarcos.com.br/>;
<http://www.guideautoweb.com/>; <http://www.planobrazil.com/>; <http://www.jornaldamadeira.pt/>.

O desempenho dos tipos de embarcação citado é atingido devido ao fenômeno do planeio, onde a embarcação, na medida em que ganha velocidade, desliza sobre a água ao invés de apenas deslocá-la. Ao iniciar o planeio, a superfície exposta à água reduz, resultando em uma diminuição da resistência ao avanço da embarcação.

A resistência ao avanço consiste na força resultante que se opõe ao movimento da embarcação, de sentido contrário ao empuxo do propulsor e à velocidade de avanço. O estudo da resistência permite o dimensionamento eficiente da embarcação, assim como a estimativa da potência instalada e outros fatores a serem considerados durante o projeto.

A base de dados disponível sobre resistência ao avanço, suas componentes e parâmetros significativos, foram adquiridos através de ensaios em tanques de prova realizados desde o século XIX, por Froude et al. Até os dias atuais, os ensaios com modelos em escala são empregados devido à precisão dos dados coletados, porém a um alto custo. Os métodos empíricos que surgiram dessas séries sistemáticas oferecem alternativas mais baratas e rápidas para uma estimativa consistente.

Existe, porém, a dificuldade em replicar as condições de operação de embarcações de alta velocidade em tanques de prova – e consequentemente nos métodos empíricos baseados em testes em tanques. Baseando-se nessa dificuldade, o presente trabalho busca estudar o fenômeno de planeio e propõe a abordagem do método CFD para resolvê-lo.

Os resultados computacionais são então comparados com os resultados obtidos através da aplicação dos métodos empíricos propostos por Savitsky (1964), descritos no trabalho de Marin (2015) para a embarcação analisada.

A realização das simulações, bem como a comparação dos resultados com aqueles obtidos pelo método empírico de Savitsky, buscam uma melhor compreensão do fenômeno de planeio, além de discutir as razões para as eventuais divergências constatadas nos resultados de ambos os métodos de análise empregados.

1.1 Objetivo geral

Este trabalho possui como objetivo geral o estudo de simulação numérica em CFD com o objetivo de reproduzir o fenômeno de planeio e obter resultados de resistência ao avanço da embarcação em função de sua velocidade. Ao final, os resultados obtidos com CFD são comparados a aqueles obtidos pelo método de Savitsky (1964).

1.2 Objetivos específicos

- Levantar as ferramentas de simulação numérica atuais disponíveis.
- Caracterizar o problema de planeio, modelando-o nos *softwares* de simulação em CFD, registrando e documentando o passo-a-passo do processo.
- Realizar simulação de embarcação em regime multifásico de fluidos.
- Incluir nas simulações estudo de movimento de corpo rígido da embarcação, buscando maior semelhança com o fenômeno real.
- Obter resultados de resistência ao avanço em função da velocidade da embarcação via CFD.
- Avaliar os resultados obtidos em CFD com o método semi-empírico de Savitsky (1964).
- Monitorar o comportamento dos movimentos de *heave* e *pitch* e das resistências de pressão e fricção durante as simulações, avaliando-os.
- Realizar séries de simulação com variação paramétrica do LCG e do deslocamento da embarcação, determinando a influência destes parâmetros na estimativa da resistência.
- Levantar as fontes de incerteza do estudo, com o objetivo de reduzi-las em trabalhos futuros

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seção visa caracterizar a resistência ao avanço, definindo suas componentes e influências, estudar a sustentação dinâmica originada da interação casco-fluido, responsável pelo fenômeno de planeio, e a ferramenta de simulação numérica em CFD, cada vez mais empregada na solução de problemas reais de escoamento.

2.1 Ensaios Experimentais

William Froude (1810-1879) é considerado um dos pioneiros no campo de utilização de modelos em escala reduzida em tanques para estimativa da resistência. Froude propõe em sua lei da similaridade (1868) que a força total que uma embarcação enfrenta ao se deslocar pode ser dividida em uma parte fricional e outra residual (LEWIS, 1988). Foi responsável pela proposição de que corpos geometricamente semelhantes e em velocidades equivalentes poderiam ter sua resistência residual escaladas por um fator de força de origem gravitacional.

As técnicas sofisticadas para medição de características hidrodinâmicas de embarcações em tanques de prova, existentes nos dias de hoje, ainda aplicam os conceitos originais propostos por Froude (PICANCO, 1999). A Figura 2 exibe registros dos primeiros tanques de testes utilizados.

Figura 2. Primeiros tanques de prova.



Tanque de Froude (1872)



Tanque de Danny (1883)

Fonte: Journée (2002).

Testes experimentais em escala baseiam-se no conceito de similaridade geométrica, cinética e dinâmica, para produzir um ambiente de testes em modelos cujos resultados possam ser aplicados a embarcações reais. A similaridade geométrica diz respeito à relação entre as dimensões do modelo e da embarcação, enquanto que a similaridade cinética, diz respeito à aspectos de similaridade em função do tempo. São apresentados, respectivamente, exemplos dessas similaridades nas equações 2.1 (geométrica) e 2.2 (cinemática).

$$\frac{L_{modelo}}{L_{real}} = \lambda_L \quad (2.1)$$

$$\frac{V_{modelo}}{V_{real}} = \lambda_v \quad (2.2)$$

A similaridade ou semelhança dinâmica consiste na semelhança das forças atuantes sobre o modelo e a embarcação. Para atingir a condição de similaridade dinâmica, o modelo é imposto ao mesmo valor de constante de similaridade que a embarcação real. Dentre as constantes existentes, duas se destacam, o número de Reynolds e o número de Froude, definidos nas equações 2.3 e 2.4.

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (2.3)$$

$$R_n = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (2.4)$$

Onde:

L – Comprimento;

V – Velocidade;

ρ – Densidade;

μ – Viscosidade;

ν – Viscosidade cinemática.

A utilização de ambas as constantes adimensionais simultaneamente só é possível se o comprimento do modelo for o mesmo da embarcação real, ou seja, um modelo em escala 1:1. Isso significa que apenas uma das constantes pode ser mantida em condição de igualdade ao realizar testes em um modelo reduzido utilizando um tanque de provas.

Se as forças viscosas e inerciais devem se manter similares, é utilizado o número de Reynolds. Caso as forças inerciais e gravitacionais devam ser similares, então o número de Froude deve ser utilizado (LANGAN, 2004). O número de Froude é comumente utilizado nos cálculos de ressalto hidráulico, estruturas hidráulicas e projeto de navios (IGNÁCIO, 2004).

No cálculo de resistência ao avanço de embarcações, o número de Reynolds pode ser associado a resistência friccional, enquanto que o número de Froude pode ser associado a resistência de ondas da embarcação.

Para atingir a igualdade de número de Reynolds, a velocidade é inversamente proporcional ao fator de escala do modelo embarcação (equação 2.3). Isso significa que para testes com modelos em escala reduzida, a velocidade imposta ao modelo deve ser maior à situação real.

A similaridade do número de Froude estabelece que a velocidade é proporcional à raiz do fator de escala ($\sqrt{\lambda}$), resultando na realização de ensaios com modelos em velocidades menores, as quais reproduzem as condições de velocidade da embarcação real.

Como exemplo de aplicação da similaridade de Froude, considerando uma embarcação de 26 pés, a 30 nós, tem-se:

$$F_{n,embarcação} = \frac{v_{emb}}{\sqrt{gL_{emb}}} = \frac{15,43m/s}{\sqrt{(9,81m/s^2)(7,93m)}} = 1,75$$

Se um ensaio com um modelo de 1 metro for realizado, para que o ensaio seja similar dinamicamente à embarcação real, tem-se:

$$F_{n,modelo} = \frac{v_{mod}}{\sqrt{gL_{mod}}} = 1,75 = \frac{v_{mod}}{\sqrt{(9,81m/s^2)(1,0m)}} ;$$

$$v_{mod} = 5,48m/s$$

Os testes em tanque devem operar a uma velocidade de mais de 5,4m/s para replicar as condições reais. A maioria dos carros dinamométricos de tanques de prova anda a, no máximo, 5,0m/s, inviabilizando o ensaio de embarcações de alta velocidade.

Para testes de embarcações rápidas onde velocidades reais chegam a valores acima de 35 nós, a replicação por parte dos componentes de um tanque de provas torna-se difícil ou até impraticável. Não existe, no Brasil, tanques de reboque que consigam realizar testes a estas velocidades, motivando o uso de técnicas computacionais.

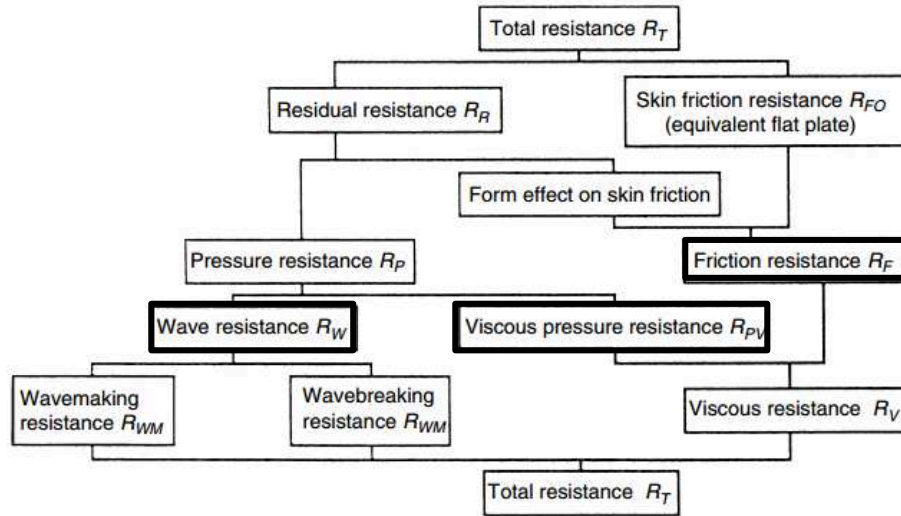
2.2 Resistência ao Avanço

De acordo com Bertram (2000), a movimentação de uma embarcação em meio fluido (água), a uma velocidade constante V , gera dois tipos de esforço sobre o casco: normal e tangencial; suas resultantes se opõem ao movimento da embarcação. A força total contrária ao movimento da embarcação é chamada de resistência ao avanço ou *drag*.

Devido à dificuldade de medição da resistência em embarcações reais, o estudo desta advém principalmente de testes em tanques de prova, utilizando modelos em escala, que datam desde o fim do século XIX e início do século XX.

A resistência ao avanço em águas calmas pode ser dividida em componentes, as quais usualmente interagem entre si, dificultando ou mesmo impossibilitando seu cálculo individual (BERTRAM, 2000).

A resistência ao avanço total, em águas calmas, pode ser decomposta principalmente em Resistência de Fricção (Atrito), Resistência de Pressão Viscosa e Resistência de Ondas. A Figura 3 apresenta o esquema com as componentes detalhadas da resistência ao avanço, destacando as parcelas a serem abordadas neste estudo.

Figura 3. Componentes da Resistência ao Avanço.

Fonte: Larsson and Baba (1996) *apud* Bertram (2000);

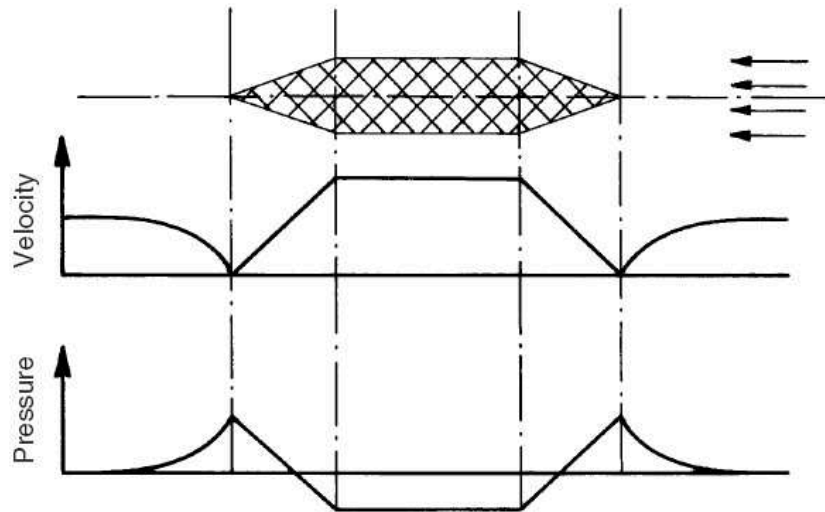
2.2.1 Resistência de Fricção:

Devido à condição de não escorregamento de fluidos viscosos sobre superfícies sólidas, quando a embarcação se move num fluido em repouso, as partículas próximas ao casco tendem a se aderir à superfície, adquirindo a velocidade da embarcação. A medida que a distância aumenta, a variação de velocidade diminui e, a uma certa distância do corpo o escoamento é quase invíscido. A zona intermediária entre a película de estagnação e de escoamento uniforme forma a camada limite. As rápidas mudanças de velocidade provocam grande troca de quantidade de movimento dentro da camada limite, resultando em perdas de energia por atrito. A integral do atrito na superfície molhada do casco resulta na resistência por atrito. (TRINDADE, 2012; BERTRAM, 2000).

2.2.2 Resistência de Pressão Viscosa:

Em um escoamento ideal, ver Figura 4, com um corpo submerso profundamente, a pressão exercida na popa do corpo é igual à exercida na proa, ou seja, força resultante nula (Paradoxo D'Alembert). Na prática, efeitos viscosos reduzirão a pressão exercida na popa do navio, criando um gradiente de pressão proa-popa (TRINDADE, 2012).

Figura 4. Distribuição de pressão em um escoamento ideal invíscido.



Fonte: Bertram (2000).

A forma do casco da embarcação induz campos locais de escoamento que diferem da velocidade média do escoamento total. Os efeitos viscosos reduzirão a pressão exercida na popa do navio.

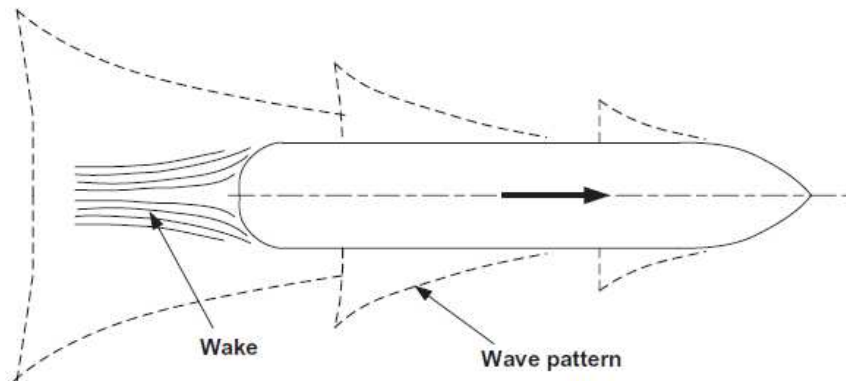
Contribuições à resistência de pressão viscosa incluem perdas de energia na camada limite, com o aumento da espessura desta e, em alguns casos, potencializada por separação de escoamento, afirma Trindade (2012). Induzidos por discontinuidades no casco e pelo caráter viscoso, a separação do escoamento rente à superfície do casco forma vórtices, que induzem mudanças no campo de velocidade e, conseqüentemente, nos campos de pressão distribuídos pelo casco. De acordo com Zhang (2004), devido à predominância de perdas de pressão viscosa se dar devido à geração de vórtices, alguns autores a referenciam como *Eddy-Making Resistance* (Resistência de Geração de Vórtices).

2.2.3 Resistência de Ondas:

Resultado da interação do casco com a superfície da água, a energia empregada na geração e destruição de padrões de ondas compõe a resistência de ondas (BERTRAM, 2000). Originalmente estudada por Kelvin (1887), que através de

experimentos observou a formação de um sistema de ondas transversais e divergentes pelo deslocamento do casco. A Figura 5 ilustra o movimento de uma embarcação pela água, e o padrão de ondas que se forma e acompanha a embarcação. Uma região de turbulência se forma a ré da embarcação, se estendendo e formando a esteira (*Wake*).

Figura 5. Padrão de ondas e esteira.



Fonte: Molland (2011)

Diversos métodos foram desenvolvidos para estimativa da resistência ao avanço de embarcações, os quais tipicamente baseados em ensaios com modelos em escala reduzida e calculados via interpolação dos dados ensaiados de maneira paramétrica.

ITTC (1957) divide a resistência total entre atrito e residual; e considera que o fator de resistência residual é igual para o modelo e navio, levando em consideração outros coeficientes e fatores de correção.

O método de Hughes-Prohaska, classificado como um método de fator de forma de acordo com Trindade (2012), divide a resistência entre uma componente de resistência de ondas e outra de resistência de forma do casco. Baseia-se no método da ITTC (1957), com correções e utilização do fator de forma $(1 + k)$, assumido como independente dos adimensionais Froude e Reynolds, e igual para embarcação real e modelo.

Modificação do método de Hughes-Prohaska, o ITTC (1978) é um aprimoramento dos anteriores, adicionando coeficientes de correção e inclusão da resistência do ar.

De acordo com Molland (2011), para as altas velocidades de embarcações planantes, a parcela de ondas da resistência torna-se pequena. A pressão viscosa,

porém, torna-se responsável pela maior parcela da resistência contrária ao movimento da embarcação.

A estimativa da resistência ao avanço de embarcações planantes representa um salto de complexidade devido aos aspectos dinâmicos do estudo, cujo equilíbrio de forças varia ao longo do curso da embarcação, dificultando seu registro.

Segundo Almeter (1993), métodos desenvolvidos por Savitsky, Shufor e Lyubomirov se destacam entre os existentes para estimar a resistência ao avanço de embarcações em regime de planeio. Dentre eles, o método de Savitsky é considerado o o mais preciso na previsão do comportamento da embarcação e estimativa da resistência.

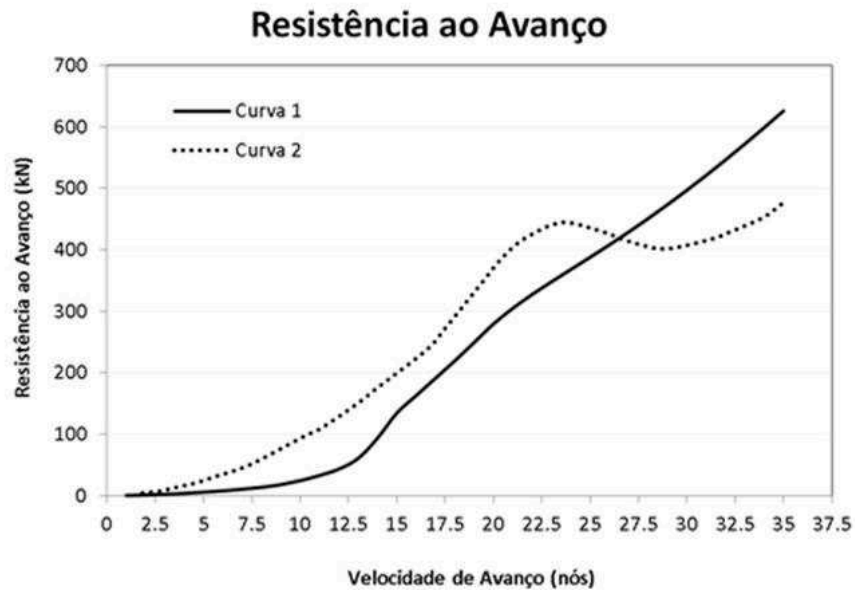
2.3 Embarcações de Planeio

O advento de cascos planantes é motivado pela condição de resistência ao avanço máxima teórica existente nas embarcações deslocantes. A partir de certa velocidade (número de Froude em torno de 0.5), a embarcação enfrenta tanta resistência, que a sua propulsão não é suficiente para vencê-la e acelerar, estabelecendo assim um limite de viabilidade para o casco deslocante

Com o planeio, a resistência ao avanço é reduzida através da diminuição da área molhada do casco e, conseqüentemente, a interação casco-água que promove a resistência ao avanço

Na Figura 6 é mostrada a comparação entre as curvas de resistência ao avanço de uma embarcação planante e de uma deslocante. Observa-se que o casco planante tem uma diminuição da resistência ao avanço total após entrar em planeio

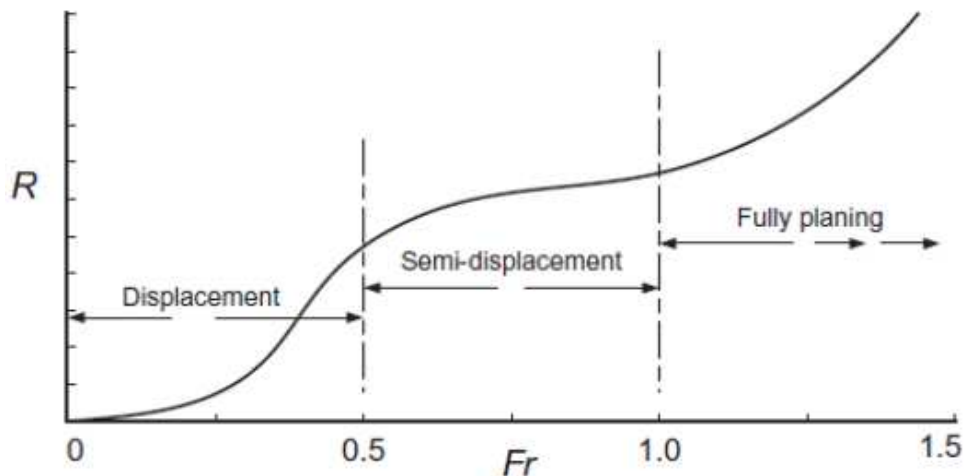
Figura 6. Resistência de embarcação planante (Curva 2) e deslocante (Curva 1).



Fonte: Autor (2014).

A curva de velocidade de uma embarcação de planeio pode ser dividida em três estágios distintos, como apresentado na Figura 7. Da situação de repouso até baixas velocidades, a embarcação atua como deslocante. O seu comportamento muda com o aumento da velocidade, atingindo o regime de semi-planeio, onde apresenta a maior elevação da popa e geração de *wake*. Acima desse intervalo, a um número de Froude tipicamente maior que 1,0, a embarcação entra em regime de planeio, com uma maior estabilidade e redução do trim até atingir o equilíbrio.

Figura 7. Classificação das faixas de resistência ao avanço.

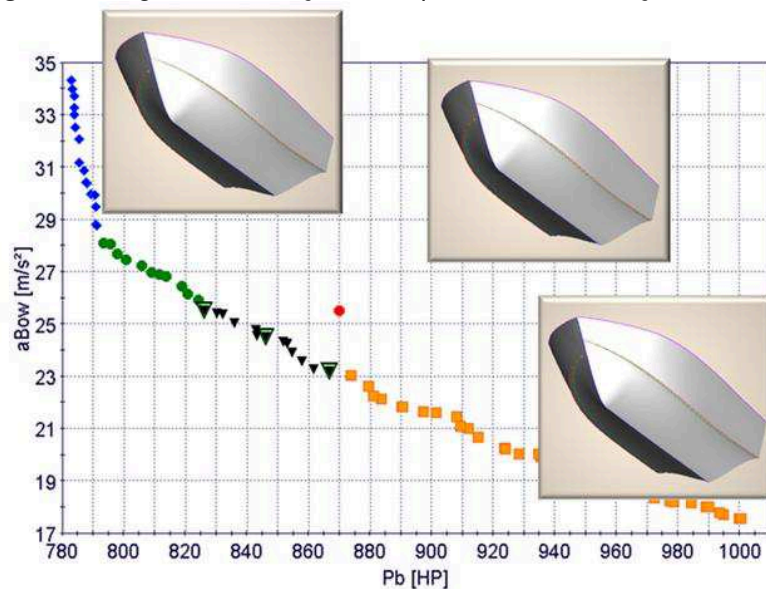


Fonte: Molland (2011).

Embora o objetivo principal do estudo da resistência ao avanço seja a diminuição desta com a maximização da velocidade, existe um ponto prático ótimo, pois outros fatores começam a comprometer o desempenho geral da embarcação.

A utilização de cascos com fundos chatos permite que a embarcação atinja o pré-planeio mais rapidamente, diminuindo a resistência ao avanço, mas isso gera o desconforto de uma aceleração vertical muito acentuada, mesmo a baixas velocidades. A Figura 8 exibe o diagrama de relação entre a aceleração vertical e a potência exigida pelo motor, para uma série sistemática de mudanças geométricas no casco, desde o fundo chato ao formato em 'V'.

Figura 8. Diagrama de relação entre potência e aceleração horizontal.



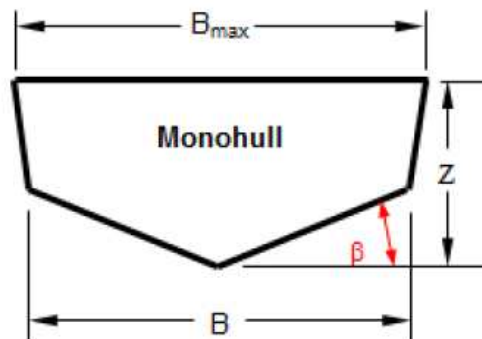
Fonte: Tancredi et al. (2012).

Existe uma relação de equilíbrio entre esta e outras variáveis no comportamento de uma embarcação de planeio, que deve ser respeitada a fim de atingir um compromisso entre o conforto e o desempenho da embarcação.

A embarcação de planeio, ou *High-Speed Craft*, é tipicamente uma embarcação leve, de casco em 'V' ou achatado, que devido a um ângulo de ataque em relação à superfície da água proporciona sustentação hidrodinâmica a partir de dada velocidade. Esse comportamento será melhor discutido na seção 2.4.

A Figura 9 apresenta o principal ângulo que determina o formato da embarcação, destacado em vermelho, o ângulo β é chamado “*deadrise*”. Esse ângulo varia ao longo da embarcação, sendo valores menores na popa sofrendo incrementos até a proa. O valor desse ângulo também caracteriza os locais para os quais a lancha foi desenvolvida para navegar. Valores menores destinam-se à águas abrigadas e ângulos maiores caracterizam embarcações destinadas à águas abertas. (MARIN, 2015).

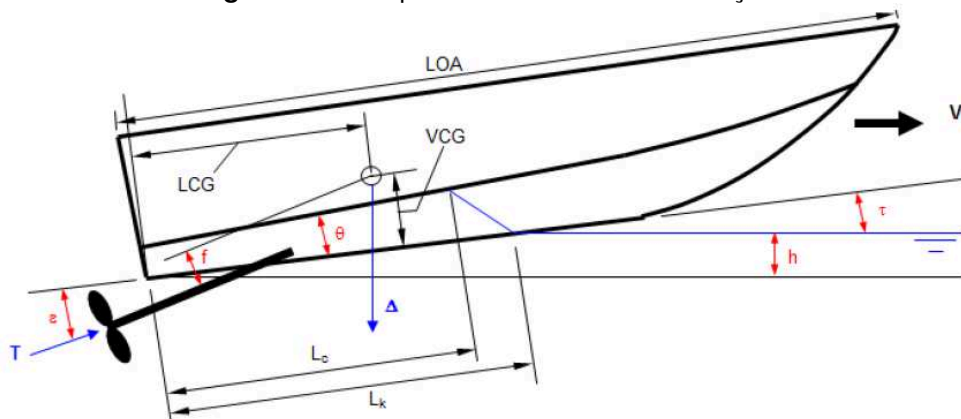
Figura 9. Vista anterior do formato 'V' do casco e ângulo de *deadrise*.



Fonte: Savitsky (1964).

A Figura 10 mostra a vista lateral da embarcação, apresentando um dos principais ângulos para embarcações de planeio, o trim (τ). Este determina a inclinação da embarcação em relação ao plano de linha água. O trim influencia na navegabilidade e estabilidade, sendo um parâmetro a ser considerado para diferentes condições de mar, a fim de obter o melhor desempenho.

Figura 10. Principais dimensões da embarcação.



Fonte: Savitsky (1964).

Onde:

LWL – comprimento linha d'água estática;

B – boca medida entre as quinas principais;

VCG – centro vertical de gravidade: distância vertical entre o centro de gravidade (CG) e a quilha;

LCG – centro longitudinal de gravidade: distância longitudinal entre CG e a quilha na popa;

Δ – deslocamento;

β_T – ângulo de deadrise na popa transom;

L_k – comprimento molhado até a quilha;

L_c – comprimento molhado até a quina principal

θ – ângulo entre a quilha e a quina principal;

ε – ângulo entre a quilha e a linha de operação do propulsor;

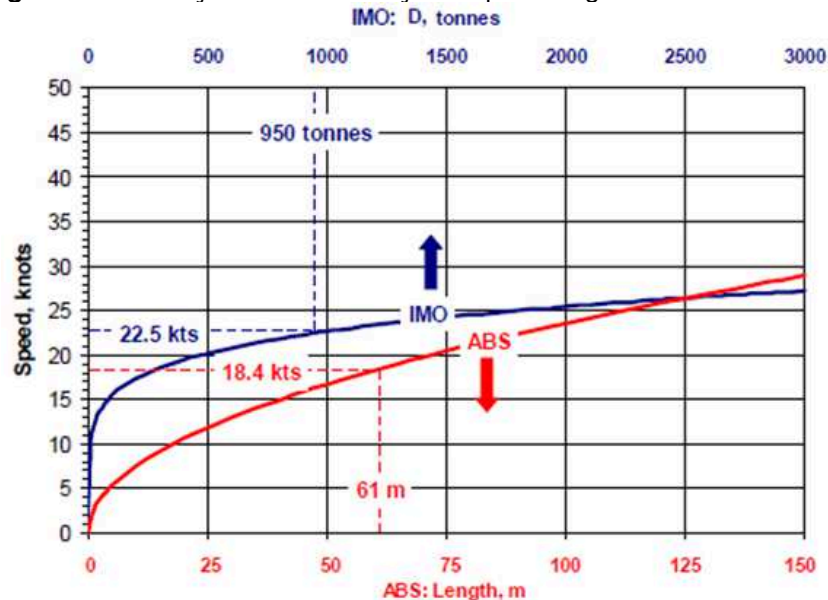
f – distância entre a linha de operação do propulsor até o VCG;

τ – ângulo de trim: ângulo entre a linha d'água e a quilha;

h – imersão da popa transom.

As sociedades classificadoras possuem, tipicamente, duas definições distintas para as embarcações leves de alta velocidade, a utilizada pela *American Bureau of Shipping* (ABS) e a utilizada pela *International Marine Organization* (IMO) e outras sociedades classificadoras. Apresentada na Figura 11 está a comparação de ambas as classificações discutidas.

Figura 11 - Definições de embarcações rápidas segundo a IMO e a ABS.



Fonte: *Ship Structure Committee* (2005).

A classificação pela ABS baseia-se na velocidade em função do comprimento total da embarcação, enquanto a IMO utiliza a velocidade em função do deslocamento. Embora não seja possível compará-las diretamente sob a mesma dimensão, é um diagrama útil, pois exhibe diferentes critérios que podem ser complementados quando se tratando de uma mesma embarcação.

Ambas as classificações possuem limitações. Para a classificação da IMO e de outras sociedades classificadoras, o tempo e a distância são os principais limites. É importante que determinada embarcação não leve mais do que um tempo 't' para ir do abrigo, em condição de repouso, até a condição de velocidade completamente desenvolvida. As limitações impostas pela ABS dizem respeito às zonas sazonais estabelecidas pela *International Conference on Load Lines* (1966), como pode ser visto no Anexo A.

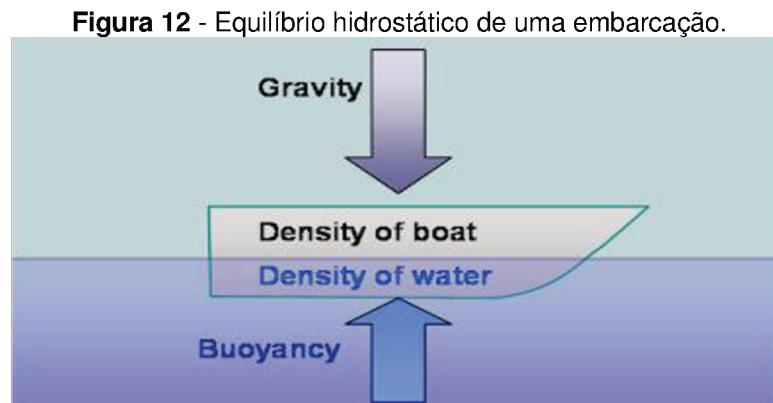
Outros autores, como Baird (1998), definem as embarcações rápidas como aquelas que operam acima de 30 nós. Faltinsen (2005), afirma que o que define as embarcações rápidas são suas características hidrodinâmicas, como o número de Froude volumétrico (F_{nV}), equação 2.5, onde um valor acima de 4,0 definiria a embarcação como de alta velocidade.

$$F_{nV} = \frac{V}{\sqrt{gV^{1/3}}} \quad (2.5)$$

Para Savitsky (1992), uma embarcação é considerada de planeio quando seu número de Froude (F_n) de operação está acima de 1,2 e, complementado por Faltinsen (2005), esse número pode ser aproximado para $F_n > 1,0$ (HAMIDON et al, 2009/2010).

2.4 Sustentação Dinâmica

A sustentação hidrostática de embarcações, conhecida também como Princípio de Arquimedes, é a força realizada pelo volume de água deslocado pelo casco a qual equilibra com o peso da própria embarcação. Nesta condição considera-se que a embarcação encontra-se em equilíbrio hidrostático. Na Figura 12 é mostrado um esquema do equilíbrio de forças hidrostáticas.



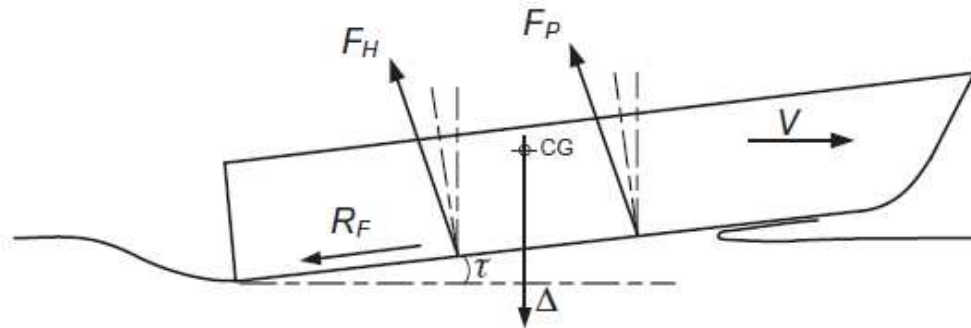
Fonte: Remis (2013).

A movimentação da embarcação em meio fluido viscoso provoca resistências ao seu movimento. O incremento de velocidade de avanço provoca uma reação dinâmica do fluido sobre o casco. A geometria do casco permite que a resistência do fluido não seja oposta ao vetor de deslocamento do casco, mas também possua uma componente normal à este, possuindo componentes verticais e horizontais. O aumento da velocidade aumenta a reação ao movimento por parte do fluido, intensificando ambas as parcelas: vertical e horizontal.

Uma maneira simplificada de entender a sustentação (força hidrodinâmica vertical) é entender que, devido ao formato do casco, o escoamento do fluido, ao encontrar o casco, é deslocado para baixo. Pelo princípio de ação e reação, o fluido empurra o casco para cima, caracterizando a força de sustentação hidrodinâmica.

A Figura 13 mostra as forças atuantes no movimento da embarcação durante o planeio. De acordo com Molland (2011) forças de sustentação neste regime são principalmente hidrodinâmicas, com parcelas hidrostáticas cada vez menores ($F_p \gg F_h$), à medida que a embarcação se ergue e seu volume submerso diminui.

Figura 13. Força dinâmica de sustentação.



Fonte: Molland (2011).

Onde:

V – Velocidade

R_F – Resistência de Fricção

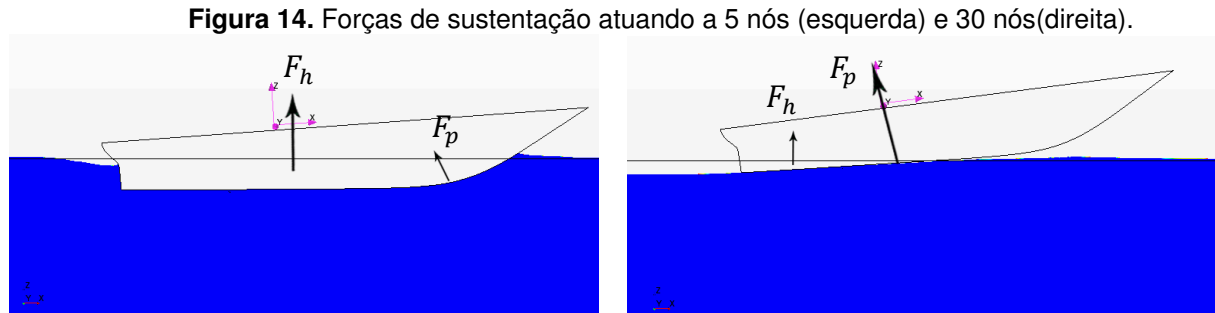
F_p – Força de pressão – Sustentação dinâmica

F_h – Força hidrostática

τ – Trim

A mudança do ângulo de trim durante o movimento da embarcação deve-se ao momento gerado pela resultante das forças hidrodinâmicas e sua distância ao CG. Com o aumento da velocidade, a resultante das forças hidrodinâmicas tem seu ponto de atuação deslocado em direção a linha do CG da embarcação. O semi-planeio e planeio ocorrem quando essa resultante é suficiente para sustentar o peso da embarcação em movimento (massa x aceleração), gradualmente emergindo-a. As fases iniciais ($V \approx 0$) e

finais ($V = V_{max}$) do movimento da embarcação podem ser melhor vistas no esquema da Figura 14.



Fonte: Autor (2015)

A partir de certa velocidade, a resultante gerada pela interação casco-fluido continuará a aumentar, mas sua distância reduzida ao CG da embarcação provocará uma variação de momento cada vez menor, até encontrar uma situação de equilíbrio estável.

2.5 Método empírico de Savitsky

Os trabalhos desenvolvidos por Daniel Savitsky representam talvez o método mais usual para estimativa do comportamento de uma embarcação planante, além de seus diversos parâmetros como arrasto de fricção, centro de pressão, limites de estabilidade dinâmica longitudinal. Através das séries sistemáticas de diversos autores e contribuições de cerca de quatro décadas, Savitsky elaborou um método semi-empírico considerado preciso para predição de sustentação dinâmica de embarcações. Existem limitações de precisão decorrentes do fato dos cálculos se basearem em séries feitas com cascos prismáticos, longitudinalmente constantes, diferindo da maioria dos cascos reais. Além disso, o cálculo da posição longitudinal do centro de pressão é simplificado, comprometendo assim o resultado do equilíbrio dinâmico final da embarcação (RIBEIRO, 2002).

O método de Savitsky (1964) leva em consideração as forças de flutuação hidrostática, podendo assim ser aplicado em embarcações operando a baixas velocidades. Além disso, propõe fórmulas para sustentação e arrasto para cascos

planantes, que se baseiam em testes realizados com cascos prismáticos com variações sistemáticas de trim, ângulo *dead rise*, Lwl e L/B (RIBEIRO, 2002; HAMIDON et al, 2010).

Savitsky elaborou, através de diversos trabalhos, formulações para prever o comportamento dinâmico da embarcação em função da Velocidade (V), Boca máxima (B), Deslocamento (∇), e os seguintes coeficientes adimensionais: Froude Volumétrico (equação 2.5); Froude transversal (equação 2.6) e Coeficiente de placa plana (equação 2.7):

$$C_V = \frac{V}{\sqrt{gb}} \quad (2.6)$$

$$C_{Lb} = \frac{\rho g \nabla}{\frac{1}{2} \rho V^2 b^2} \quad (2.7)$$

O cálculo de estimativa do ângulo de trim de equilíbrio, para dada velocidade, pode ser obtido através da equação 2.8.

$$C_{Lb} = \tau^{1.1} (0.0120\sqrt{\lambda} + (0.0055\lambda^{\frac{5}{2}})/C_V^2) \quad (2.8)$$

Onde:

τ – ângulo de trim, em graus;

λ – razão entre comprimento do plano de linha d'água e boca;

V – Velocidade.

O primeiro termo da equação representa o componente dinâmico de sustentação e, o segundo, hidrostático. Para $C_V > 1,0$, a sustentação hidrostática decresce com o quadrado da velocidade.

Para um determinado ângulo de *deadrise*, o coeficiente de sustentação é definido pela equação 2.9, onde β é o ângulo de *deadrise* na posição de *mid-chine* (linha de chine intermediária do fundo).

$$C_{L\beta} = C_{Lb} - 0.0065\beta C_{Lb}^{0.6} \quad (2.9)$$

Definido o número de Froude volumétrico (F_{nV}) e a razão $LCG/\tau^{1,1}$, o método baseia-se na condição de equilíbrio descrita por Koelbel (SAVITSKY, 1964), que assume que todas as resultantes atuam sobre o CG da embarcação, cujos valores de λ e $Clb/\tau^{1,1}$ são obtidos a partir do gráfico apresentado no Apêndice A. A condição de planeio é obtida comparando λ e Lwl/B . Se $\lambda \leq Lwl/B$, a embarcação navega na condição de planeio. A resistência total pode ser estimada através da equação 2.10.

$$R_T = W \tan \tau + \frac{1}{2} \rho V^2 \lambda b^2 C_{FO} / (\cos \tau \sec \beta) \quad (2.10)$$

Onde:

C_{FO} – Coeficiente de fricção, baseado no método ITTC 1957, em função de Reynolds relativo à boca.

Através das equações 2.11 e 2.12, Savitsky (1964) define o parâmetro de Reynolds relativo à boca e V_1 , a velocidade média de escoamento no fundo do casco, menor que a velocidade de planeio à frente, por apresentar campo de pressão maior (HAMIDON et al, 2010).

$$R_{nb} = V_1 \lambda b / \nu \quad (2.11)$$

$$V_1 = V \left(1 - \frac{0.0120 \tau^{1.1}}{\sqrt{\lambda \cos \tau}} \right)^{1/2} \quad (2.12)$$

Por se tratar de um método empírico, o método proposto por Savitsky possui correções empíricas para diversos parâmetros da embarcação, assim como intervalos de validade para parâmetros como número de Froude, comprimento, razão L/B e velocidade da embarcação.

2.6 Método CFD

2.6.1 História

Do fluxo de água nos rios, ventos, correntes oceânicas até a corrente sanguínea em nosso corpo, os fluidos sempre foram objetos de interesse desde o início da civilização; d Através da observação do seu fluxo e da interação dos fluidos com corpos imersos e suspensos; físicos, matemáticos e filósofos foram, ao longo dos séculos, descrevendo e compondo meios de explicar seu comportamento.

Pioneiro nessa área, Arquimedes (287-212 A.C.) foi responsável pelos estudos acerca da mecânica estática, hidrostática e determinação de densidades e volumes de objetos. Esses estudos, na época, tiveram aplicação direta em aquedutos, portos e canais.

Leonardo Da Vinci teve papel crucial no projeto e controle de canais e portos por toda a Itália. Algumas de suas contribuições estão registradas no documento *Del moto e mistura dell'acqua*, que retrata a descrição de aspectos como superfície da água, movimento, ondas, derrame, interferência e outros fenômenos fruto de sua observação.

No Século XVII um grande passo foi dado no sentido do entendimento e equacionamento do comportamento dos fluidos, através dos trabalhos de Isaac Newton (1643-1727). Seu advento do cálculo diferencial e integral, assim como o estabelecimento das leis que compõem a mecânica clássica, foram um marco científico para a humanidade. Dentre suas contribuições para a mecânica dos fluidos, destacam-se a Segunda Lei de Newton, o conceito de Viscosidade Newtoniana, o Princípio de Reciprocidade e a relação entre o comprimento de onda com sua velocidade.

Daniel Bernoulli (1700-1782) foi responsável pela formulação da equação de Bernoulli e Leonard Euler (1707-1783) pela proposição das equações de Euler, descrevendo a conservação de massa e momento.

Os trabalhos de Claude Louis Marie Henry Navier (1785-1836) e George Gabriel Stokes (1819-1903) introduziram o conceito de viscosidade às equações de Euler, resultando nas equações de Navier-Stokes. Essas equações matemáticas diferenciais, propostas há 200 anos, são a base da Mecânica dos Fluidos Computacional, incluindo expressões para a conservação da massa, momento, pressão e turbulência. A inter-relação entre elas e a dificuldade das mesmas só tornou possível sua resolução, aplicada

a problemas reais e em tempo hábil, com o ingresso na era digital e a introdução dos computadores modernos, nas décadas de 60 e 70.

Diversos nomes ainda participaram dos avanços no campo dos fluidos; destacam-se d'Alembert, Poisson, Lagrange, Poiseuille, Rayleigh, Couette, Reynolds e Laplace entre outros.

2.6.2 Introdução ao CFD

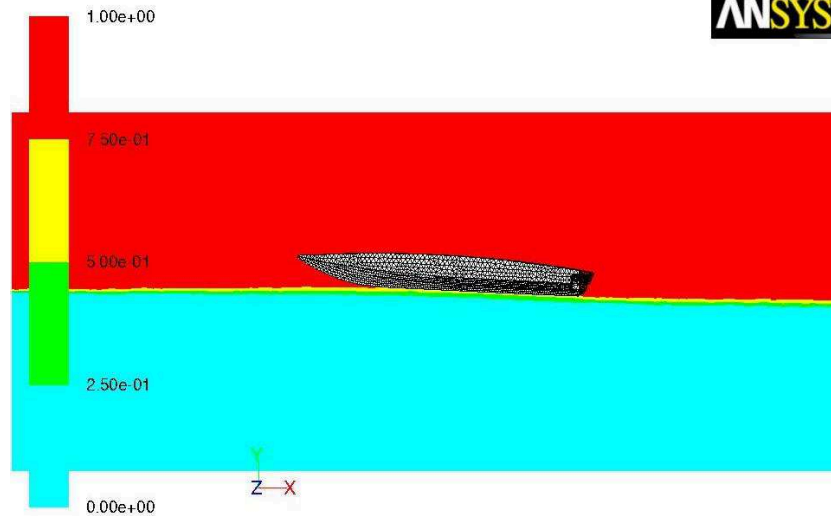
A dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics*) consiste na simulação numérica de qualquer processo físico ou químico que apresente escoamento, sendo também chamada de *Computational Flow Dynamics*, dado que estuda qualquer tipo de fluxo, seja ele de fluidos (partículas em movimento) ou calor.

O princípio do método CFD é abordar um problema real e contínuo, discretizando o domínio em elementos finitos. Desta forma, é possível realizar o equacionamento do problema e obter a resolução via esforço computacional.

É possível a aplicação de condições de contornos em múltiplos elementos finitos e a análise desses elementos no domínio do tempo e do espaço, registrando o comportamento de parâmetros (como velocidade, pressão, temperatura) do escoamento em cada um desses elementos. Uma vez unidos, os resultados das medições nos volumes ou placas finitas formam o perfil global da superfície ou corpo a ser estudado na condição desejada. A simulação baseia-se nos princípios de conservação da energia, massa e quantidade de movimento.

O padrão de simulação no qual se baseia este trabalho será a realização da simulação em CFD com regime multifásico, como apresentado na Figura 15, no qual a embarcação é interpretada como um corpo rígido com movimento.

Figura 15 - Simulação bifásica de embarcação de planeio em ANSYS FLUENT®.



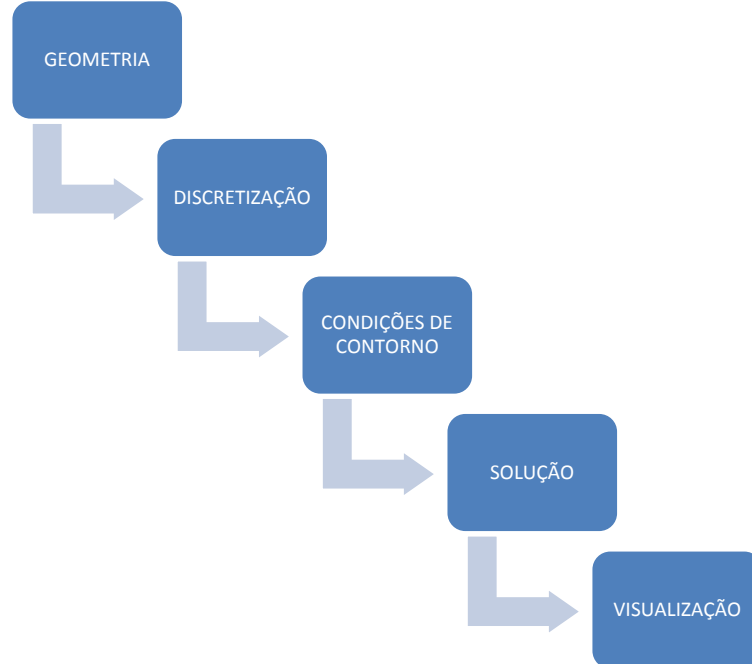
Fonte: <http://www.cfd-online.com/> (2010).

O CFD consiste na previsão acurada de fluxo de fluidos, transferência de calor, transferência de massa, reações químicas e fenômenos associados, através da solução dos modelos matemáticos governantes dos fenômenos, utilizando métodos numéricos. Atualmente, proporciona métodos qualitativos e quantitativos de prever o fluxo (de calor e de fluidos) através de:

- Modelamento matemático (equações diferenciais parciais);
- Métodos numéricos (discretização e técnicas de solução);
- Ferramentas e softwares (*solvers*, pré e pós processamento).

A Figura 16 exibe o fluxograma prático das fases típicas na utilização do CFD. Existem centenas de maneiras diferentes de definir e resolver um determinado problema utilizando esse método, dado que cada conjunto de condições de contorno e critérios de discretização (*mesh*) caracterizam uma solução única para o problema.

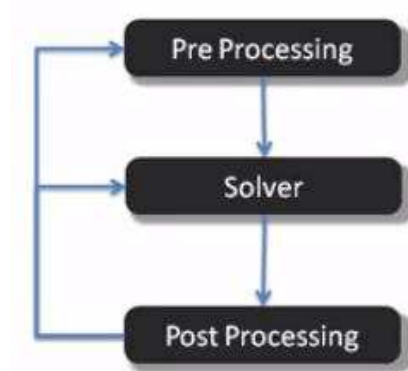
Figura 16. Fluxograma das etapas típicas de uma simulação em CFD.



Fonte: Autor (2015).

As etapas exibidas na Figura 16 consistem na sequência de preparo e utilização do CFD, o qual pode ser separado em três etapas principais: Pré-processamento, Solver e Pós processamento (Figura 17).

Figura 17. Passos que formam a análise CFD.



Fonte: www.cctech.co.in (2015).

O Pré-processamento consiste na geração da geometria a ser utilizada como objeto de estudo, assim como todos os processos e tratamentos a ela impostos e determinação do volume de controle apropriado. Ainda nesta primeira etapa, define-se o

processo de discretização a ser utilizado, ou *meshing* (posteriormente abordado no item de desenvolvimento). Por último, a determinação das condições de contorno que constituem a solução única ao problema de escoamento.

Por *Solver* entende-se a etapa de definição matemática do problema e resolução deste, por meio de métodos numéricos. Consiste na especificação do problema, utilização de modelos físicos e matemáticos para modelá-lo e extenso esforço computacional para simular o comportamento de fluxo e resolução do modelamento matemático proposto.

Por último, a etapa de Pós-processamento de dados é a análise, interpolação e interpretação dos resultados obtidos, de maneira que seus relatórios transmitam visualmente dados pertinentes sobre o comportamento do fluido. Embora a este ponto o problema de fluxo já tenha sido resolvido, a importância dessa etapa reside na correta escolha de visualização de dados (intervalos, limites, animações e zooms), através de uma gama de ferramentas disponíveis nos *softwares* de simulação.

A simulação numérica utilizando CFD representa um marco da era moderna no entendimento do escoamento de fluidos. Suas principais vantagens são, entre outras:

- Baixo custo – Comparado às séries sistemáticas ou construções de estudos em tamanho real.
- Rapidez – Convergência em simulações com grande malha de dados (acima de 10M de células) pode levar dias, de acordo com o problema estudado. Entretanto, é mais rápido do que a construção e execução de testes em modelos físicos.
- Confiabilidade – Embora não seja isento de erros, o CFD apresenta alto grau de confiabilidade de resultados para fenômenos macroscópicos.

Existem limitações impostas principalmente pela capacidade computacional disponível atualmente, que atribuem um erro numérico ao cálculo de resolução de EDP. Além disso, modelos matemáticos são constantemente aprimorados para melhor representarem os fenômenos físicos estudados. Por fim, as próprias condições de contorno conferem limitações ao estudo.

2.6.3 Equações Governantes

São as equações que regem os fenômenos de mecânica dos fluidos estudados pelo CFD. As formas aqui apresentadas se aplicam a um fluxo viscoso, inconstante, tridimensional e compressível.

As equações de Navier-Stokes foram originalmente nomeadas como o conjunto de equações de conservação de momento. A literatura CFD moderna expandiu essa nomenclatura a todas as equações governantes da mecânica dos fluidos, em regime viscoso (ANDERSON & WENDT, 2009).

Conservação da Massa (equação da continuidade)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.13)$$

Conservação do Momento

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (2.16)$$

Conservação da Energia

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \vec{V} \right] \\ &= \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial(u p)}{\partial x} - \frac{\partial(v p)}{\partial y} - \frac{\partial(w p)}{\partial z} + \frac{\partial(u \tau_{xx})}{\partial x} \\ &+ \frac{\partial(u \tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u \tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v \tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v \tau_{yy})}{\partial y} \\ &+ \frac{\partial(v \tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w \tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w \tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w \tau_{zz})}{\partial z} + \rho \vec{f} \cdot \vec{V} \end{aligned} \quad (2.17)$$

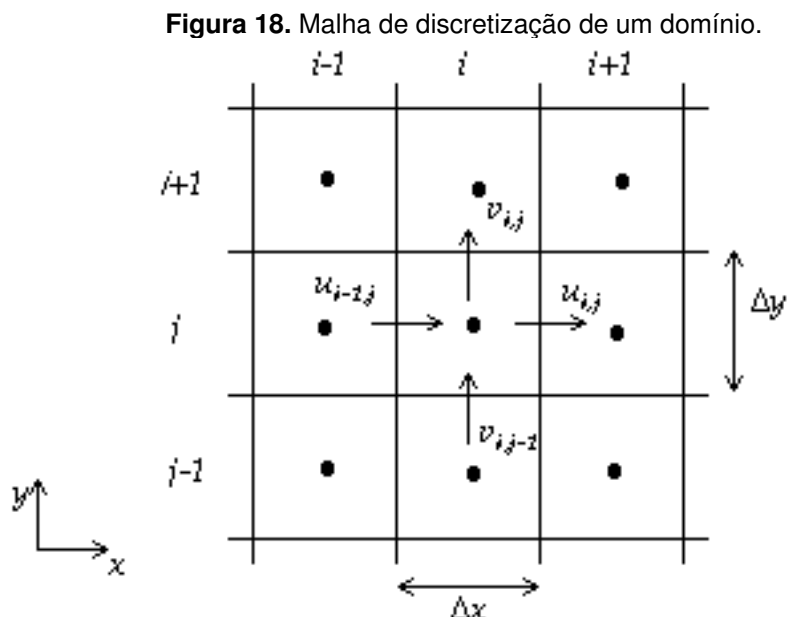
Ao considerar o escoamento incompressível, as formas das equações (2.13) a (2.17) mudam, uma vez que a densidade do fluido torna-se constante ao longo do escoamento. A desconsideração do caráter viscoso e a eliminação de todos os seus termos das equações de Navier-Stokes resulta nas equações de Euler.

Em escoamentos turbulentos, as equações de Navier-Stokes se aplicam, mas o esforço computacional necessário para resolvê-lo é amplificado. Isso se deve a escala espaço-tempo das menores ocorrências do fenômeno de turbulência ser da ordem de 10^2 vezes menor que o domínio do escoamento, resultando em um número mínimo de pontos alto para descrever cada unidade de volume estudada - chegando à ordem de 100 mil pontos por centímetro cúbico.

Devido a isto, modelos computacionais específicos para regimes turbulentos são utilizados, assim como modelos termodinâmicos, separações de fases discretas, espécies múltiplas, reações químicas, entre outros.

2.6.4 Discretização

Consiste na divisão de um domínio em partes, dispostas em uma malha e devidamente localizadas por um sistema de coordenadas, como mostrado na Figura 18.



Fonte: Harvard (<http://acmg.seas.harvard.edu/>).

A obtenção de uma solução analítica exata para um problema composto por Equações Diferenciais Parciais (EDP) não é simples, em alguns casos, impossível (CCTECH, 2015). Para condições de contorno e regiões que permitem simplificações, as EDP podem ser resolvidas com transformadas de Laplace mas praticamente em toda sua extensão, uma aproximação da solução exata é empregada. Trata-se de uma solução numérica, aproximando as EDO por um sistema de equações algébricas para as variáveis, distribuído em células em uma discretização de espaço-tempo.

O estudo acontece com um caráter contínuo e as equações de Navier-Stokes são aplicáveis em toda a extensão do volume de controle. Embora o fenômeno seja contínuo, as equações de Navier-Stokes são EDO de segunda ordem, não-lineares e, para resolvê-las, os métodos de solução realizam o particionamento do domínio em seções menores. A partir das equações diferenciais parciais governantes, são criadas versões particulares e aproximadas, que são então resolvidas.

Existem diversos parâmetros para a discretização do domínio, que dizem respeito à discretização espacial, topologia de malha, termos invíscidos e ordem da solução. O objetivo é transformar um problema de cálculo, que não pode ser resolvido, em um problema de álgebra, com solução. O processo introduz erros, que podem ser reduzidos com o entendimento do problema e a escolha dos parâmetros e métodos adequados para cada estudo.

O tempo de processamento aumenta exponencialmente com o número de elementos do modelo. Assim, uma discretização mais refinada reduz os erros, no entanto, aumentam consideravelmente o custo computacional.

2.7 Método Analítico

A complexidade do estudo da dinâmica de embarcações planantes e da resistência ao avanço dificulta o desenvolvimento de métodos analíticos para sua solução. Existem métodos analíticos em desenvolvimento para a estimativa da resistência ao avanço de embarcações planantes que se baseiam em modelos de queda de cunha. Estes, porém, fogem ao escopo deste trabalho e não serão abordados ou discutidos.

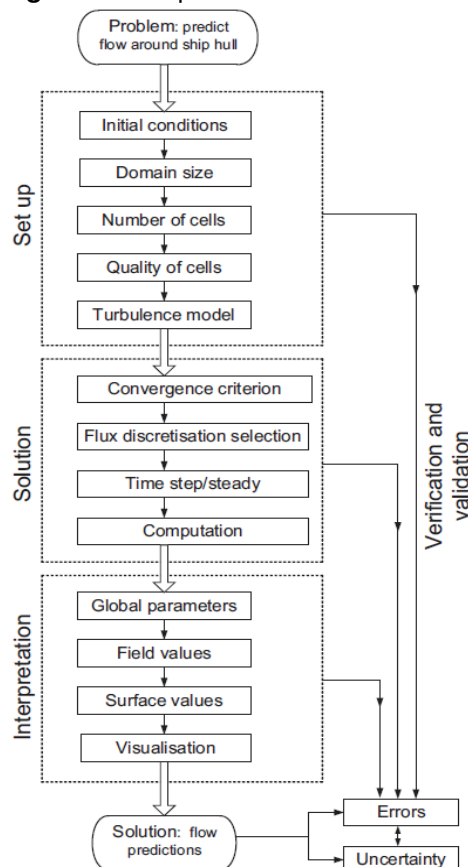
3 METODOLOGIA

A Metodologia empregada consiste na aplicação dos métodos discutidos nos itens anteriores, a fim de gerar resultados que possam ser comparados entre si e com eventuais resultados experimentais.

A aplicação do método de Savitsky inicia com a determinação das dimensões principais do casco a ser estudado, parâmetros de operação, e segue os passos abordados no trabalho de Marin (2015).

Após levantada a resistência pelo método de Savitsky, utilizando o modelo desenvolvido e apresentado por Marin (2015), o estudo de caso em simulação numérica é empregado, onde o casco é gerado em *Computer Aided Design* (CAD) e são definidas as condições de contorno. Molland (2011) proporciona uma visão detalhada do processo lógico de simulação em CFD, apresentado na Figura 19.

Figura 19. Sequência utilizada em CFD.



Fonte: Molland (2011).

Os softwares empregados para as análises CFD foram o ANSYS®, utilizando o módulo FLUENT® ou CFX®, e o STAR-CCM+®. Para o caso estudado, o método utilizado é o de CFD multifásico. As fases presentes são o ar e a água, separadas pela linha d'água.

A interpretação dos resultados dar-se-á através da comparação dos resultados obtidos pelo método empírico de Savitsky com aqueles obtidos nas simulações numéricas utilizando CFD. Individualmente, os resultados serão analisados e discutidos com o comportamento esperado.

O passo final da validação deste estudo, não contido dentro deste, prevê a realização de ensaios experimentais para o modelo em escala da embarcação estudada. Através desses ensaios, resultados precisos do comportamento hidrodinâmico da embarcação poderão ser comparados aos obtidos via CFD e Savitsky, permitindo afirmações sobre precisão de ambos os métodos.

4 DESENVOLVIMENTO

Esta secção reúne todos os passos dados no sentido de caracterizar o problema de simulação (modelagem) nas plataformas selecionadas. As principais etapas no processo de simulação em CFD são abordadas e brevemente discutidas.

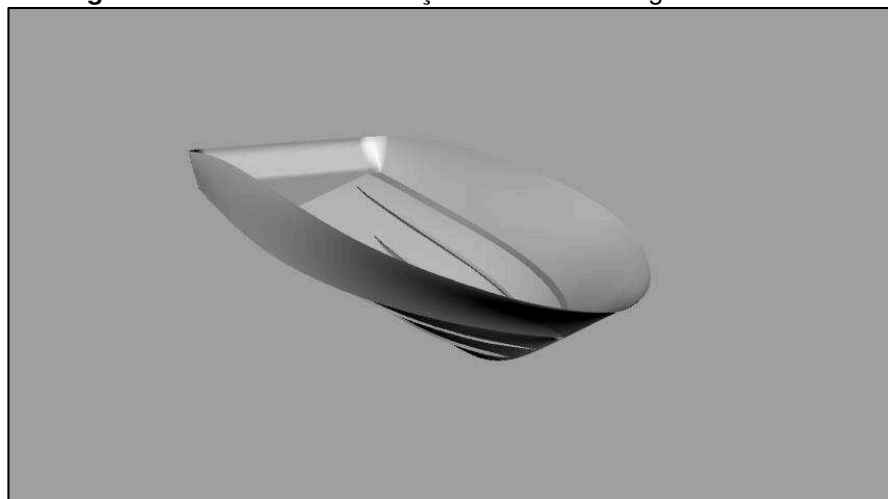
4.1 Plataforma ANSYS

4.1.1 Geometria

A Geração da geometria é a fase inicial do processo de simulação, representando a construção das curvas e pontos formadores do objeto que será posteriormente interpretado como sólido, volume de controle, lâmina de separação etc, de acordo com a configuração do problema proposto pelo usuário.

Para o presente problema, a geometria utilizada é de uma lancha de alumínio de 26 pés, gerada através do software Rhinoceros®, como mostrado na Figura 20.

Figura 20. Casco da embarcação utilizado como geometria base.



Fonte: Autor (2015).

Com a construção finalizada, a geometria deve ser exportada como IGES ou STEP, formatos de arquivos chamados de *open format geometry*, ou arquivos CAD personalizados, como ACIS. A preferência de formato a ser utilizado é o ACIS, pois

preserva critérios de união entre curvas, pontos e superfícies, mas não é interpretado por todos os softwares de simulação. Neste caso específico, utilizamos o ANSYS Workbench® para realizar a construção do estudo, desde a importação da geometria até o relatório dos resultados.

4.1.1.1 Importação da Geometria

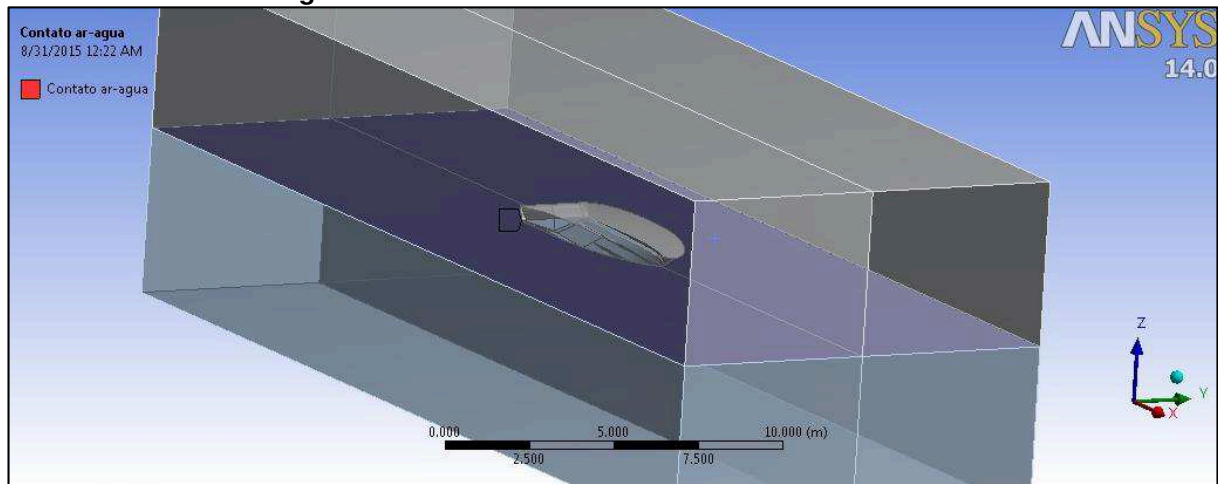
O arquivo da geometria, gerado a partir de programas CAD, salvo em formatos compatíveis pela plataforma ANSYS, é importado pelo módulo de construção do programa, Design Modeler. Nesta etapa, erros de geometria devem ser detectados e reparados, pois influenciam na qualidade da construção do corpo e, conseqüentemente, na qualidade da malha, podendo limitar ou truncar a mesma.

A sequência de passos adotada é arbitrária e serve apenas como sugestão para reprodução dos dados, lembrando que estes podem ser reproduzidos de diversas maneiras distintas.

Antes de seguir adiante, é necessário a determinação do Volume de Controle (VC), zona de interesse para o estudo onde, tipicamente, encontrasse o volume de fluido a ser analisado.

Neste caso, a geração do paralelepípedo que servirá de volume de controle foi realizada no próprio Rhinoceros, e importada juntamente com a geometria do casco para o Design Modeler. O Volume de Controle construído é um paralelepípedo de 30 metros de comprimento, 12 de largura e 10 de altura, no qual o casco está inserido. Ele foi seccionado ao meio, longitudinalmente, de maneira que a interação entre os dois novos VC corresponda a interação das duas fases, ar e água, como visto na Figura 21.

Figura 21. Geometria do casco com volume de controle definido.

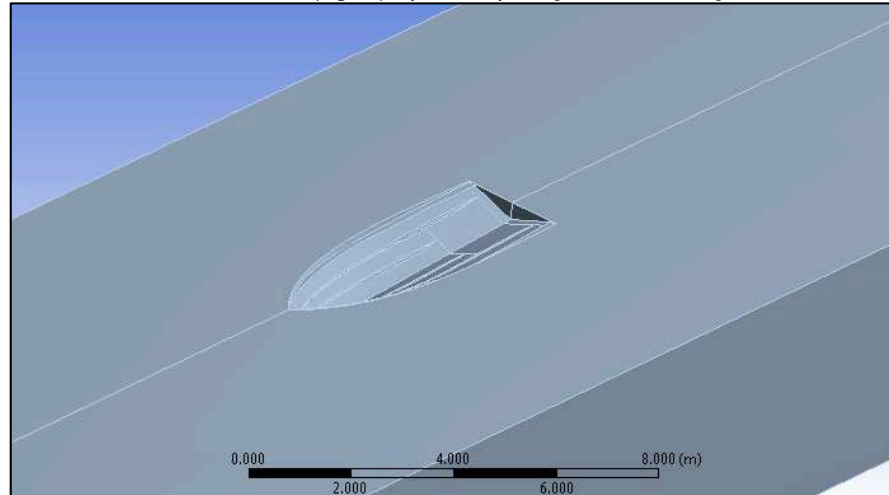


Fonte: Autor (2015).

Para caráter desta sequência de passos, será realizado o método de estimativa sem o equacionamento de equilíbrio dinâmico, ou seja, sem a simulação de corpo rígido da embarcação. Sem o movimento de corpo rígido, a embarcação encontra-se fixa à malha global, enfrentando o escoamento do fluido e permanecendo estática. É uma abordagem simplificada do comportamento da embarcação que permite, em muitos casos, a aproximação dos resultados reais.

Antes de iniciar a discretização do volume a ser estudado, é necessário passar ao programa o interesse da simulação que, neste caso, é todo o escoamento e regime de fluido interagindo com o casco da embarcação. Para tal, é necessário a realização de operações booleanas de subtração das superfícies sólidas fechadas que compõem o casco, dos volumes de controle. O resultado dessa operação pode ser conferido na Figura 22.

Figura 22. Volume de controle (água) após a operação de subtração do casco.



Fonte: Autor (2015).

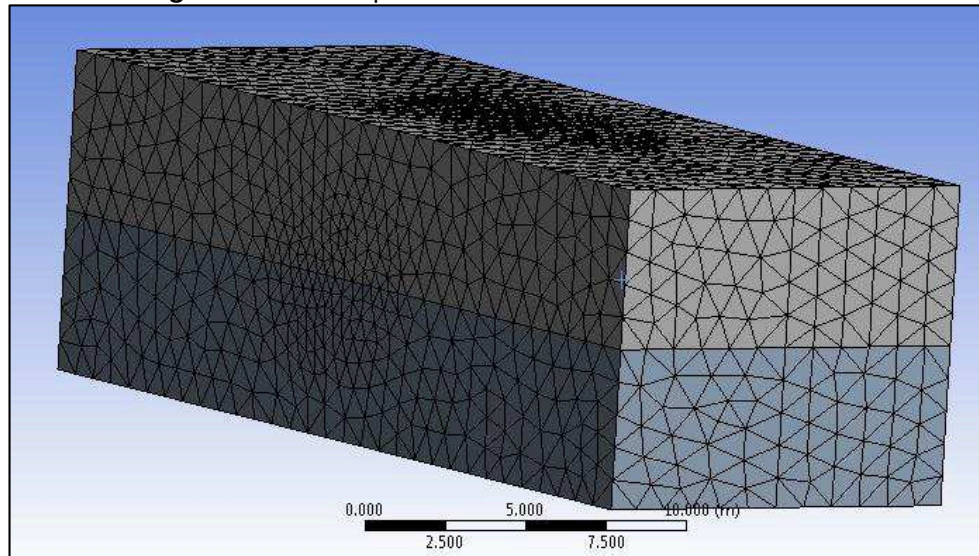
4.1.2 Malha

A etapa de *meshing* consiste na divisão de todo o volume de controle em volumes finitos, de maneira a descrever o comportamento de um macro volume composto por diversos volumes menores. O refinamento da malha é diretamente proporcional a precisão dos dados a serem calculados e, igualmente, ao esforço computacional necessário para resolver as EDO, resultando em um tempo exponencialmente maior de simulação.

O módulo ANSYS Meshing é o software utilizado nesta etapa, que receberá a geometria já trabalhada e descrita no item 4.1.1.

É necessário informar ao módulo o tipo de problema a ser equacionado. Isso permite que ele otimize a geração de malha para obter o melhor resultado possível. Neste caso, a análise CFD é selecionada e o tipo de solução (*solver*) é o módulo FLUENT. A escolha da malha é tetraédrica e seu refinamento é fino com dimensionamento automático, baseado em proximidade e curvatura das geometrias. Com isso, o programa irá julgar onde será necessário um refinamento de malha, ao observar interações de superfícies, incidência de ângulos e curvas. Concluída a configuração dos parâmetros, a malha está pronta para ser calculada e seu resultado é mostrado na Figura 23.

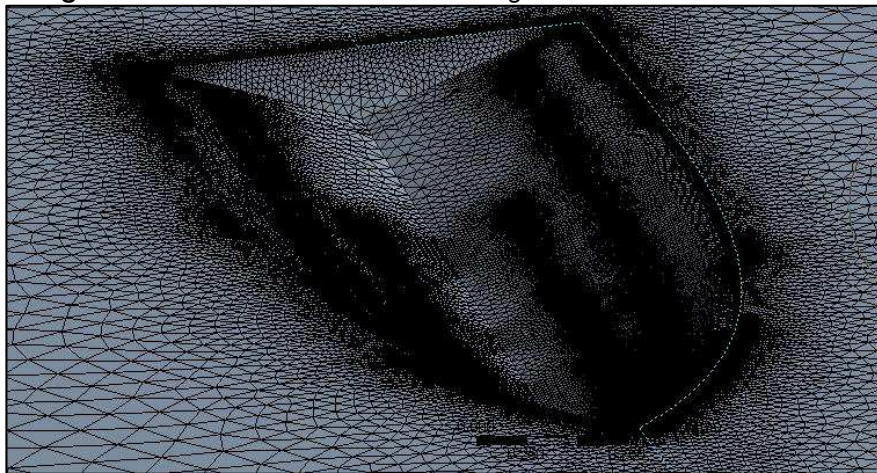
Figura 23. Malha aplicada ao volume de controle estudado.



Fonte: Autor (2015).

A distribuição da malha pelo volume de controle deve ser conferida, principalmente próxima à região de interação do fluido com a superfície do casco. A Figura 24 exibe uma secção do VC na superfície de interação ar-água, onde é possível ver o refinamento da malha a medida que esta se aproxima da região de interação com o casco.

Figura 24. Refinamento da malha na região de contato com o casco.

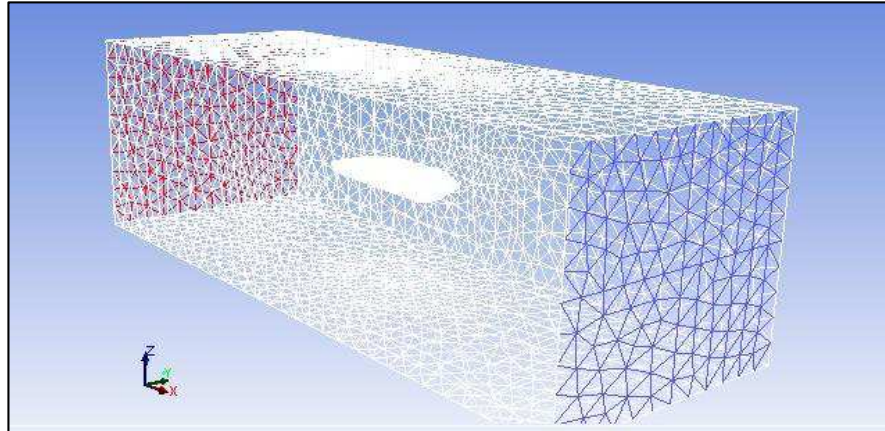


Fonte: Autor (2015).

4.1.3 Configuração

Todas as informações do processo são passadas ao software que aplicará o módulo de solução (solver) ao problema, e a Figura 25 ilustra a etapa de verificação da malha.

Figura 25. Modelo e Domínio importados e verificados no software de simulação.



Fonte: Autor (2015).

Inicialmente, o número de fases presentes no problema deve ser informado, assim como as características e propriedades de cada fase. Para a interação ar-água, existem modelos que descrevem o comportamento da tensão superficial da água, devendo ser definidos na camada de separação de fases.

O método de análise *Volume of Fluid* (VOF) é escolhido, por apresentar dois volumes de fases propriamente separados. A orientação de agentes externos, como a gravidade, é informada e as condições de contorno definidas. Os *inlets* representam onde os fluidos entram no VC e, os *outlets*, a saída dos mesmos. Nesta etapa é traçada uma condição de simetria, permitindo uma simulação em um volume de controle metade do tamanho original e extrapolando o resultado para todo o V.C.

Os contornos das diferentes fases são aplicados, para permitir a visualização dos resultados, assim como os monitores, que coletarão informações escolhidas ao longo de cada iteração durante a simulação.

O número de *time steps* (passos) e seu intervalo são informados ao programa. Essas informações ditam o tempo total que a análise representará na simulação, ou seja, um número de *time steps* de 4000 com um intervalo de 0,001s realiza uma simulação de

um escoamento ao longo de 4 segundos. O tempo necessário para realizar o esforço computacional, no entanto, é estimado em dias.

4.1.4 Conclusões

A utilização do software ANSYS foi bem sucedida nas etapas de preparo da simulação, porém, diversas dificuldades foram encontradas durante o processo, o que resultou na interrupção do estudo neste *software*. A qualidade e competência do programa não serão aqui abordadas, visto que apenas o tempo hábil de trabalho não foi suficiente para percorrer o caminho de aprendizado do mesmo.

4.2 STAR CCM+

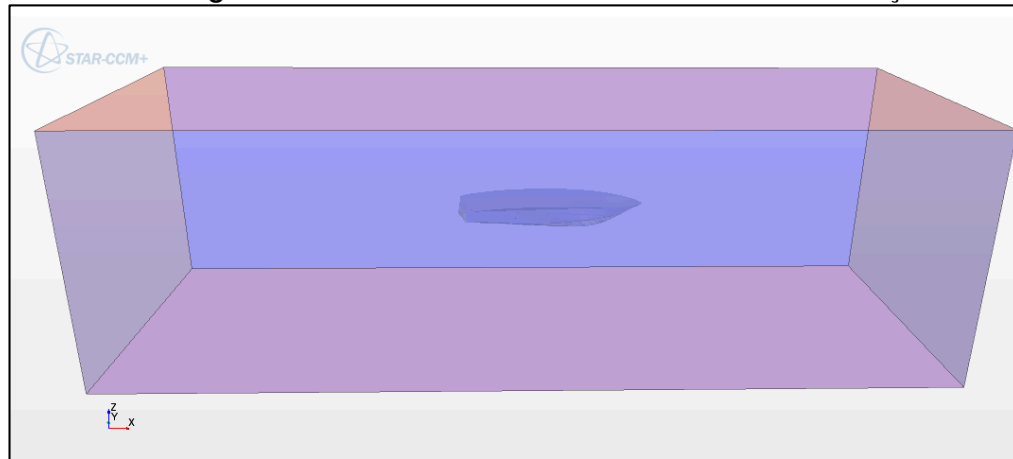
STAR CCM+ é um software de simulação de CFD que unifica as diversas etapas de construção da simulação em um único programa.

Devido às diferenças entre ambos os *softwares* abordados neste trabalho, será descrita a série lógica de passos na construção da simulação para o STAR CCM+. Esta difere da sequência da seção 4.1 porque o software utiliza as condições de contorno como *input* na geração de malha, pois na segunda fase do estudo serão considerados o movimento de corpo rígido ao casco da embarcação.

4.2.1 Geometria

A geometria importada é interpretada como um conjunto de superfícies e curvas constituintes de corpos, podendo ser combinada ou dividida conforme necessário. A visão inicial do ambiente de simulação com a geometria pode ser vista na Figura 26.

Figura 26. Modelo em CAD do casco e ambiente de simulação.



Fonte: Autor (2015).

O arquivo original, em formato STEP ou IGES, foi trabalhado no *software* Rhinoceros para verificar a qualidade da geometria. Originalmente apenas meio casco, a geometria foi espelhada para representar o casco completo e em seguida, o convés foi criado a partir da ferramenta *loft* para construção de superfícies. A geometria foi exportada como um conjunto de superfícies e curvas, *polysurfaces*, no formato nativo do Rhinoceros, 3DM. No módulo geométrico do STAR-CCM+, essas superfícies distintas foram mantidas para, posteriormente, serem convertidas em regiões de contorno, permitindo que tolerâncias de contato de malha pudessem ser aplicados à estas. O Apêndice B apresenta imagens no ambiente do *software* e características da geometria do casco.

O estudo apresenta dois corpos principais distintos: o volume de controle (contendo o escoamento multifásico de fluido) e a embarcação. Essa distinção se faz necessária para a definição previa das condições de contorno, possibilitando aplicação de diferentes malhas e características a cada região de contorno.

A qualidade da geometria influencia diretamente na precisão da construção da malha e no resultado da simulação, conferindo a esta etapa atenção minuciosa a detalhes. Falhas de construção, desconexão de curvas e pontos devem ser observados e devidamente reparados utilizando as ferramentas presentes no pacote STAR CCM+ ou outro *software* CAD.

4.2.2 Parâmetros Físicos

As simulações em CFD possuem modelos matemáticos que permitem o equacionamento de fenômenos físicos, como turbulência, vorticidade, gravidade, entre outros. Os modelos utilizados nesta simulação estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Modelos matemáticos do STAR-CCM+.

Modelo Matemático	Definição
<i>Implicit Unsteady</i>	Escoamento transiente.
<i>Eulerian Multiphase</i>	Fases Eulerianas de interação de fluidos.
<i>Volume of Fluid – VOF</i>	Modelagem numérica de superfície livre ou superfície de interação de fluidos.
<i>Turbulent</i>	Regime turbulento.
<i>K-Epsilon Turbulence</i>	Turbulência como função de Reynolds.
<i>Gravity</i>	Gravidade.
<i>VOF Waves</i>	Modelo de ondulação, correnteza e vento.

Fonte: CD-Adapco (2015).

O parâmetro *Implicit Unsteady* modela o comportamento do escoamento ao longo do tempo. Para o fenômeno transiente, existe a variação do comportamento do fluido no domínio do tempo, que pode ser descrito pelo *software* de duas formas: Explícito ou Implícito.

“The Coupled-Explicit solver should only be used for unsteady flows when the characteristic time scale of problem is on same order as that of the acoustics. e.g., tracking transient shock wave” (Fluent® User-Guide).

A discretização das derivativas do tempo no regime transiente caminha em passos, definidos como *time steps*, sendo a solução atualizada a cada passo. O escoamento transiente implícito trata a solução da integral da função transiente de forma implícita,

realizando diversas iterações para cada passo. Considere um problema com uma função genérica dependente de t , como mostrada na equação 4.1.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = f(t, \phi(t)), \quad (4.1)$$

Com a integração no domínio do tempo, para um passo Δt , temos na equação 4.2:

$$\phi^{(n+1)} = \phi^{(n)} + \int_t^{t+\Delta t} f(t, \phi(t)) dt. \quad (4.2)$$

Onde o sobrescrito n é o valor da função no tempo t e, $n + 1$, para o tempo $t + \Delta t$. Na equação 4.3 temos, aproximadamente:

$$\phi^{(n+1)} = \phi^{(n)} f(t + \Delta t, \phi^{(n+1)}) \Delta t \quad (4.3)$$

Para o método explícito, a integral é definida como:

$$\phi^{(n+1)} = \phi^{(n)} + f(t, \phi^{(n)}) \Delta t, \quad (4.4)$$

O método transiente explícito realiza uma aproximação do anterior, de maneira a aproximar um dos termos da integral $t + \Delta t$ para t , resultando em um método puramente explícito, sem a necessidade de iterações para resolvê-lo.

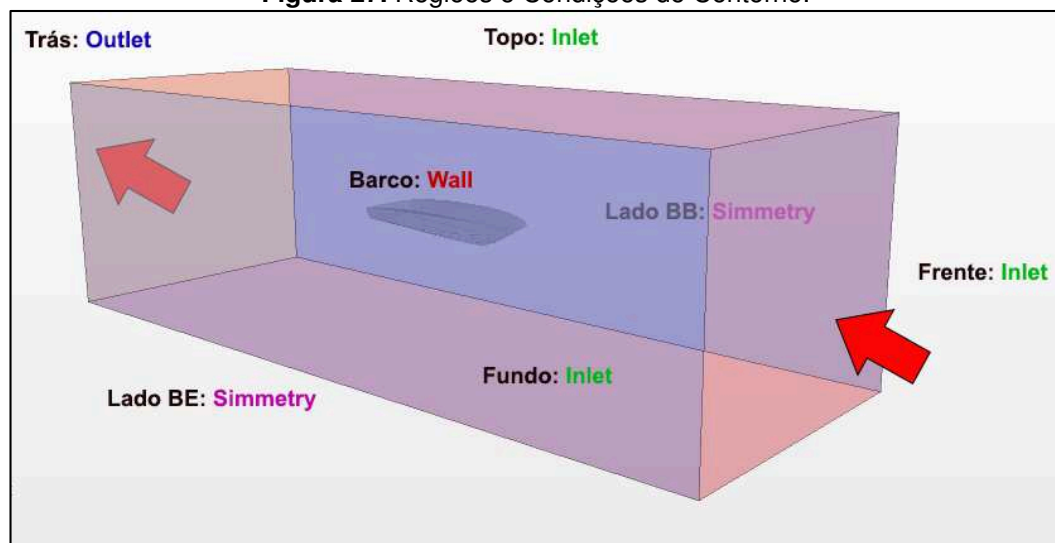
A escolha dos métodos deve levar em consideração a escala de tempo pertinente à simulação.

Eulerian Multiphase (EMP) é um modelo utilizado para descrever de maneira quase que contínua o comportamento de fluidos. Aliado com o VOF, é utilizado para a simulação de superfície com interação de fluidos imiscíveis, como o caso do escoamento de água em torno do casco de uma embarcação. Constroem um procedimento simples de avaliação de um problema complexo. O método VOF define as fases de interação de Fluidos, que são implementados devido à utilização de VOF *Waves*.

4.2.3 Condições de Contorno

As condições de contorno conferem o caráter único à solução encontrada pelo método de CFD, ditando como o *solver* aborda o problema e interpreta as diversas geometrias envolvidas. A geometria que não for transformada em condição de contorno não é levada em consideração na análise. A Figura 27 apresenta a ilustração das condições de contorno para o presente estudo.

Figura 27. Regiões e Condições de Contorno.



Fonte: Autor (2015).

À condição de contorno que define os parâmetros iniciais do escoamento dá-se o nome de *inlet*, sendo aplicada ao Topo, Fundo e Frente do volume estudado. Os lados Bombordo e Boreste são atribuídos à condição de simetria e a parte de trás, o *Outlet*. Por fim, todas as superfícies do barco são designadas à condição de *Wall*, sem escorregamento superficial.

Outlet

A condição de contorno de saída do Volume de Controle é configurada para ser um escape de pressão, mais detalhadamente em função da pressão hidrostática da VOF *Wave* definida nos modelos físicos.

Simmety

Simetria é atribuída a regiões que não devem impor resistência ao estudo e criam um espelho que, se necessário, posteriormente é utilizado para extrapolação dos resultados obtidos de um lado dessa condição, para outro. Pode ser empregado para diminuir o Volume de Controle de simulação, ao dividi-lo ao meio e apenas simular metade do escoamento interagindo com metade da geometria, visto que são simétricos a esse plano e todo a simulação se comportará simetricamente. No presente estudo, o método não foi utilizado e as condições de simetria são aplicadas às laterais do VC.

Wall

Referida também como Condição de Não-Escorregamento, onde a velocidade do escoamento normal à superfície é zero e, tangencial, é igual à velocidade da superfície. No caso da análise de resistência ao avanço de corpos submersos, essa condição é aplicada as superfícies do objeto de estudo nas áreas de interação com o fluido. As forças e momentos agindo sobre o corpo são resultantes dessa interação.

Inlet

Caracteriza a entrada do escoamento de fluido para o VC. Para todos os *inlets*, as condições são definidas pela função da *VOF Wave* mas, como apenas a parte frontal não é paralela ao escoamento do fluido (definido em termos de X, Y e Z na função *VOF Wave*), a parte superior e inferior do VC apenas realizam o escoamento bidimensional desse fluido em seus respectivos planos paralelos. (<http://www-ssc.igpp.ucla.edu/>)

4.2.4 *Malha*

A construção de malha é realizada utilizando o módulo integrado de *meshing* do STAR CCM+. Para esta etapa, diversos parâmetros precisam ser levados em consideração para garantir a qualidade dos resultados. A quantidade de células discretizadas presentes no volume de controle determina a precisão dos resultados obtidos e, proporcionalmente, o esforço computacional necessário para resolver as EDP que compõem o sistema de equações.

Duas configurações de malha global são definidas e aplicadas independentemente à embarcação e ao volume de controle. O trabalho com malhas paralelas permite a definição da malha de sobreposição, ou *overset mesh*, que resulta no movimento relativo de malhas, conferindo à embarcação deslocamento em relação ao referencial global. A Tabela 2 apresenta os parâmetros de malha utilizados.

Tabela 2. Dimensões de malhas aplicadas às regiões.

Região		Dimensão (m)
Volume de Controle	Paredes de Contorno	1,0 m
	Superfície da água	0,1 m
	Plano Longitudinal Vertical	0,1 m
Região Casco	Controle Volumétrico ao redor do Casco	0,1 m
	Casco	0,05 – 0,1 m
	Tampa (convés)	0,2 m
Global	<i>Base</i> ²	0,2 m

Fonte: Autor (2015).

Os valores variam de acordo com a relevância da região para a simulação, ou seja, quanto mais preciso o estudo do escoamento na região necessita ser, mais refinada deve ser a malha utilizada. O procedimento realizado no ambiente do *software* é apresentado no Apêndice B.

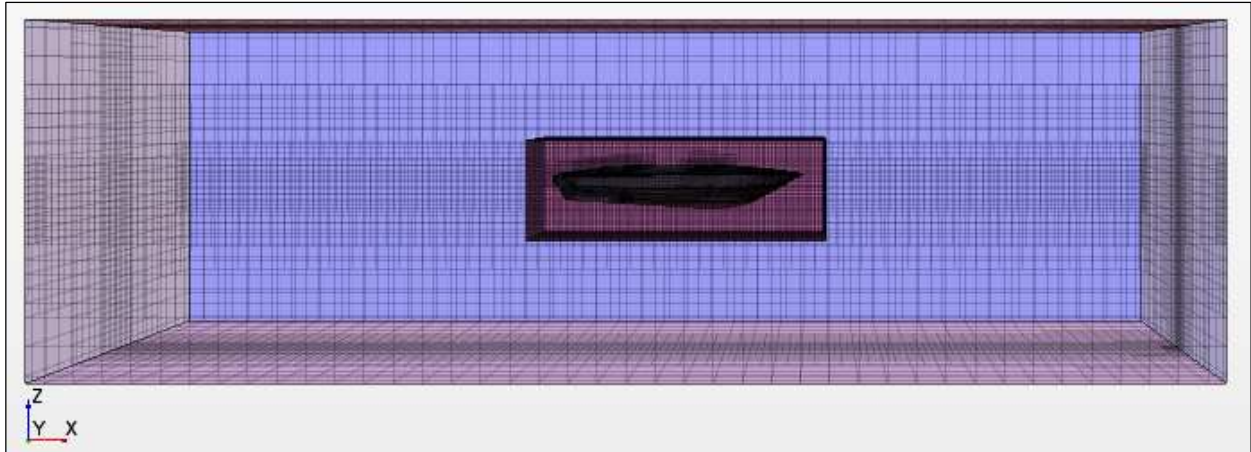
Parâmetros de controle volumétrico de tamanho de malha também foram empregados, principalmente para acompanhamento da superfície livre e proximidades da embarcação.

Como visto na Tabela 2, o controle global de malha tem seu tamanho máximo limitado a 1 metro e mínimo em 20 cm. Em regiões distantes dos entornos da embarcação, as células podem crescer e chegar a, no máximo, 1 metro. No entanto, próximas à região de estudo, são limitadas a 20cm. Próximo ao casco e em sua superfície, as dimensões mínimas oscilam entre 1 e 10 cm, podendo chegar a valores

² O valor base de malha é parâmetro de referência para as demais dimensões da etapa de discretização.

menores para garantir a correta reprodução da geometria por parte do escoamento. A malha resultante é exibida na Figura 28.

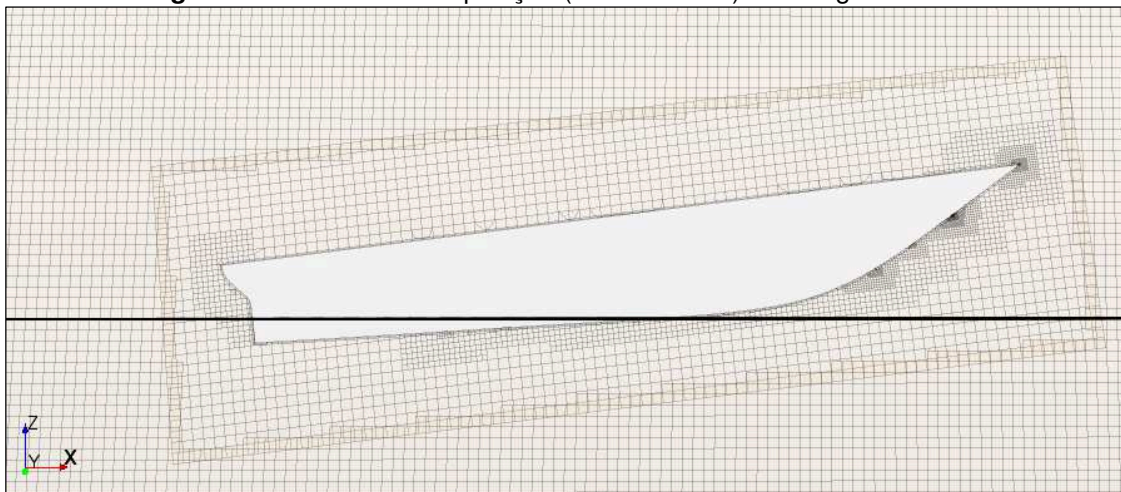
Figura 28. Volume de controle discretizado.



Fonte: Autor (2015).

É possível confirmar, através da Figura 28, as diferenças de crescimento de malha nas regiões mais distantes da embarcação, com exceção das regiões de refino próximas à superfície da água. A visualização da propriedade de independência de movimento entre o conjunto da embarcação e o Volume de Controle pode ser vista na Figura 29, onde uma rotação de *Pitch* inicial foi imposta à embarcação.

Figura 29. Malha de sobreposição (*overset mesh*) com ângulo de *trim*.



Fonte: Autor (2015).

A propriedade de sobreposição de malha permite que a embarcação, interagindo com o escoamento, adquira rotação independente do referencial global, ou *Laboratory Referential* (Star CCM+).

A zona de interação de configurações diferentes de malha é reconstruída a cada iteração, aumentando o esforço computacional necessário e o tempo total de simulação.

4.2.5 Movimento de Corpo Rígido

Referida como *Dynamic Fluid Body Interaction*, é o módulo que permite que o conjunto de superfícies que formam a embarcação seja interpretada como um conjunto sólido de moléculas constituintes de um corpo rígido. Este conjunto é capaz de sofrer movimentos como rotação e translação em até seis graus de liberdade. O estudo abordou movimento em dois graus de liberdade:

- Rotação em Y – Movimento de Pitch.
- Translação em Z – Movimento de Heave.

Além dos graus de liberdade, é necessário estipular a massa do corpo e seu momento de inércia. A massa utilizada baseou-se na condição de máximo carregamento (MARIN, 2015) de 2675kg, equivalendo à embarcação plenamente carregada com carga e tripulação. No Apêndice B estão presentes imagens com os parâmetros de inércia inseridos no *software*.

O cálculo de momento de inércia baseou-se nas publicações da SNAME, Hinrichsen (2013) e outros profissionais da área, resultando na utilização dos parâmetros definidos a seguir. De acordo com WELLS (1967), o momento de inércia I de um corpo com massa $M = \sum m_i$ em relação a um eixo é apresentado na equação 4.5.

$$I = \sum_i m_i h_i^2 = \int_v \rho(x, y, z) h^2 dv = Mk^2 \quad (4.5)$$

Onde:

m_i – massas componentes do corpo rígido.

h_i – distância da massa ‘i’ ao eixo de referência.

k – raio de giro, dependente da posição e orientação do eixo de referência.

O raio de giro terá valores diferentes para cada eixo considerado, e o cálculo realizado é uma aproximação da embarcação como um elipsoide, de mesma massa e dimensões máximas da embarcação, possuindo assim mesmo comportamento inercial. As aproximações do raio de giro empregado na embarcação estudada estão apresentadas abaixo.

$$I_{xx} = Mk_x^2 ; \text{onde } k \sim 0,35B$$

$$I_{yy} = Mk_y^2 ; \text{onde } k \sim 0,25LOA$$

$$I_{zz} = Mk_z^2 ; \text{onde } k \sim 0,2LOA$$

Resultando na matriz de momentos de inércia:

$$I_{xx} = 1.733,47 \text{ kg m}^2$$

$$I_{yy} = 10.665,79 \text{ kg m}^2$$

$$I_{zz} = 10.665,79 \text{ kg m}^2$$

4.2.6 Solução

Nesta seção serão descritos os principais parâmetros de configuração do *software* para simulação em CFD.

As configurações do *solver* permitem controle do andamento da simulação, número de iterações para cada passo (*time step*), entre outros. O estudo utilizou *time step* de 0,04s, número máximo de iterações internas ³(*inner iterations*) igual a 10, com um critério de tempo máximo de escoamento (*total physical time*) de 20,0s. Após 10 iterações de cálculos do *solver*, um *time step* se completa, representando 0,04s do tempo

³ Consistem nas iterações necessárias para completar um passo, ou *time step*. Problemas complexos ou domínios de simulação menores podem requerir mais iterações internas.

real de escoamento. Um tempo físico de 1,0s é composto então por 25 *time steps* e 250 iterações. O tempo total de 20,0s é constituído por 500 *time steps* e 5.000 iterações.

Após a configuração dos critérios de solução, é necessário informar ao programa que funções devem ser monitoradas ao longo da simulação e com que frequência isso deve ocorrer. Relatórios de *sinkage* (movimento vertical da embarcação), trim, resistência de pressão e de atrito foram criados para monitorarem o comportamento dessas funções ao longo do tempo.

A etapa de pós processamento (*Post Processing*), com a visualização, análise e discussão dos resultados é apresentada na Seção 5.

5 RESULTADOS

Compreendem todos os resultados obtidos nas séries de simulações, cuja listagem é apresentada na Tabela 3. Cada simulação modela o escoamento para atingir o regime permanente em uma velocidade. Diversas simulações devem ser realizadas para construir uma curva de resistência em função da velocidade.

Tabela 3. Estudos de simulação em CFD realizados.

Série	Estudo	Descrição	Simulações
1	<i>Malha Estática</i>	Embarcação fixa e imposta ao escoamento.	6
2	<i>Malha Dinâmica</i>	Embarcação livre em dois graus de liberdade.	6
3	<i>Malha Dinâmica – Deslocamento</i>	Variação paramétrica do calado para diversas velocidades.	12
4	<i>Malha Dinâmica – LCG</i>	Variação paramétrica do LCG para diversas velocidades.	9

Fonte: Autor (2015).

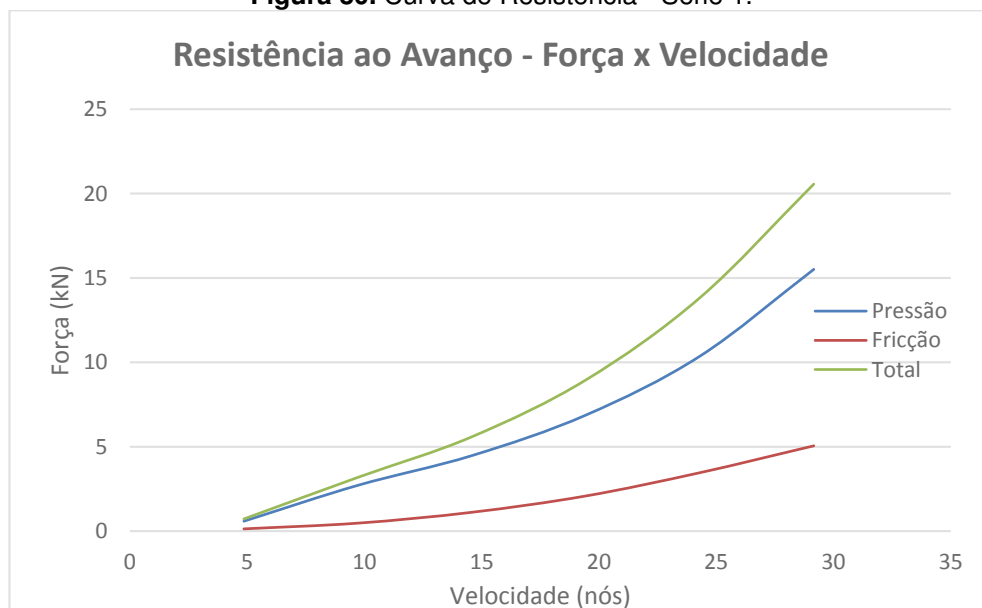
5.1 Série 1 – Estudo Estático

A primeira série de simulações levou em consideração seis valores distintos de velocidade e, para cada um, simulou o escoamento ao redor do casco da embarcação visando determinar as forças atuantes. Os resultados das simulações são apresentados na Tabela 4, Figura 30 e Figura 31. As parcelas da resistência são divididas entre Pressão e Fricção. O *software* STAR-CCM+ calcula, dentro da parcela de pressão, a contribuição viscosa e de ondas da resistência. Estas não foram avaliadas individualmente neste trabalho.

Tabela 4. Resultado do cálculo de resistência das simulações da SÉRIE 1.

Velocidade (nós)	Parcela Pressão (kN)	Parcela Fricção (kN)	Resistência Total (kN)	Potência Total (kW)
5	587,8	131,4	719,2	1.798,1
10	2.712,1	471,1	3.183,2	15.915,9
15	4.472,6	1.115,3	5.587,8	41.908,8
20	6.871,5	2.083,6	8.955,1	89.551,5
25	10.359,2	3.463,8	13.823,0	172.788
30	15.505,5	5.057,7	20.563,2	308.448,1

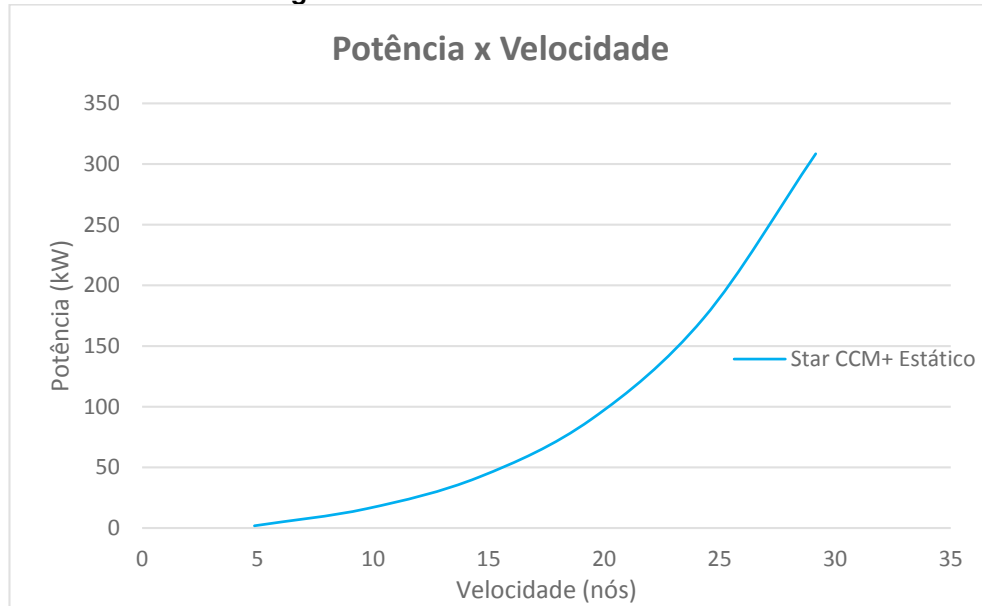
Fonte: Autor (2015).

Figura 30. Curva de Resistência - Série 1.

Fonte: Autor (2015).

A curva de Resistência mostrada na Figura 30 tem uma evolução progressiva das parcelas de Pressão e Fricção. Devido à não consideração do movimento da embarcação ao longo da simulação (estudo estático), não há mudança de angulação (*trim*), *porpoising*⁴ ou planeio; e a sustentação dinâmica atua como um incremento à resistência.

⁴ Instabilidade longitudinal oriunda da combinação de movimentos de *pitch* e *heave* da embarcação, de constante ou crescente amplitude, que ocorre durante o planeio em águas calmas (SAVITSKY, 1964).

Figura 31. Curva de Potência - Série 1.

Fonte: Autor (2015).

A curva tem característica similar à de uma embarcação deslocante, uma vez que não há diminuição do volume submerso e nem da área molhada com o aumento da velocidade.

As simulações utilizando malha estática são significativamente mais simples e, em muitos casos, uma boa opção para a representação de fenômenos físicos. Sua pertinência para o presente estudo será abordada na seção 5.3, quando comparada à simulação de corpo rígido e resultados obtidos por Savitsky.

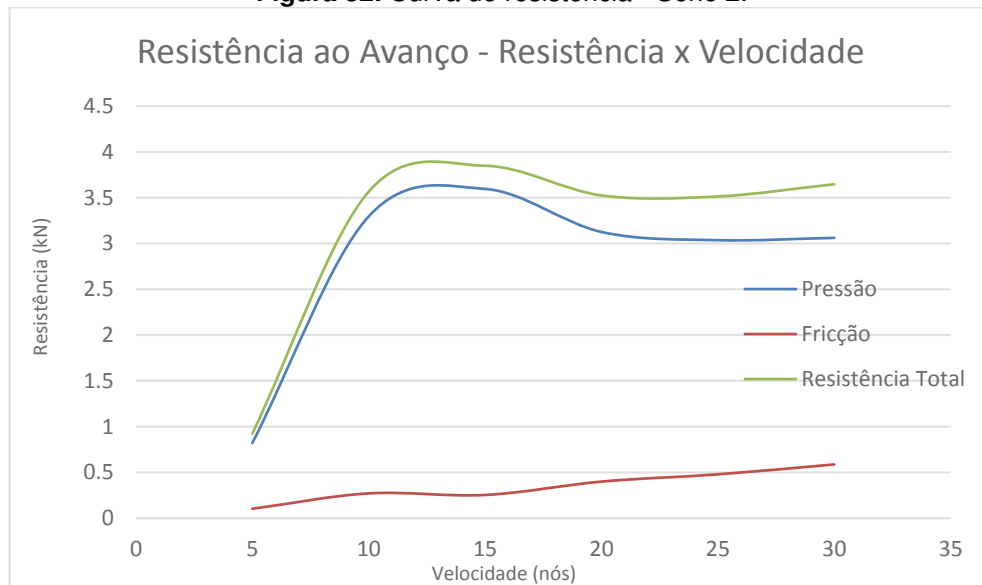
5.2 Série 2 – Estudo Dinâmico: Movimento de Corpo Rígido (*DFBI*)

Assim como a série de simulações no item 5.1, seis simulações foram conduzidas para construir a estimativa da resistência ao avanço em função da velocidade da embarcação. Os dados são mostrados na Tabela 5, Figura 32 e Figura 33.

Tabela 5. Valores de resistência das simulações da SÉRIE 2.

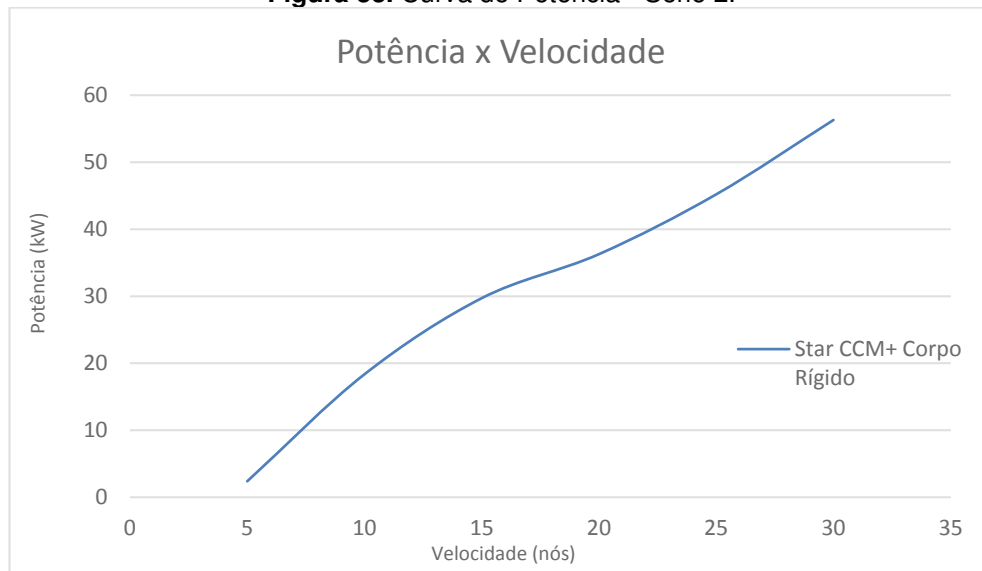
Velocidade (nós)	Parcela Pressão (kN)	Parcela Fricção (kN)	Resistência Total (kN)	Potência Total (kW)
5	821,1	103,5	924,6	2.378,3
10	3.296,4	270,7	3.567,1	18.351,0
15	3.595,9	253,7	3.849,6	29.706,0
20	3.125,9	399,5	3.525,5	36.273,1
25	3.036,1	478,3	3.514,5	45.200,0
30	3.061,5	586,2	3.647,8	56.297,0

Fonte: Autor (2015).

Figura 32. Curva de resistência - Série 2.

Fonte: Autor (2015).

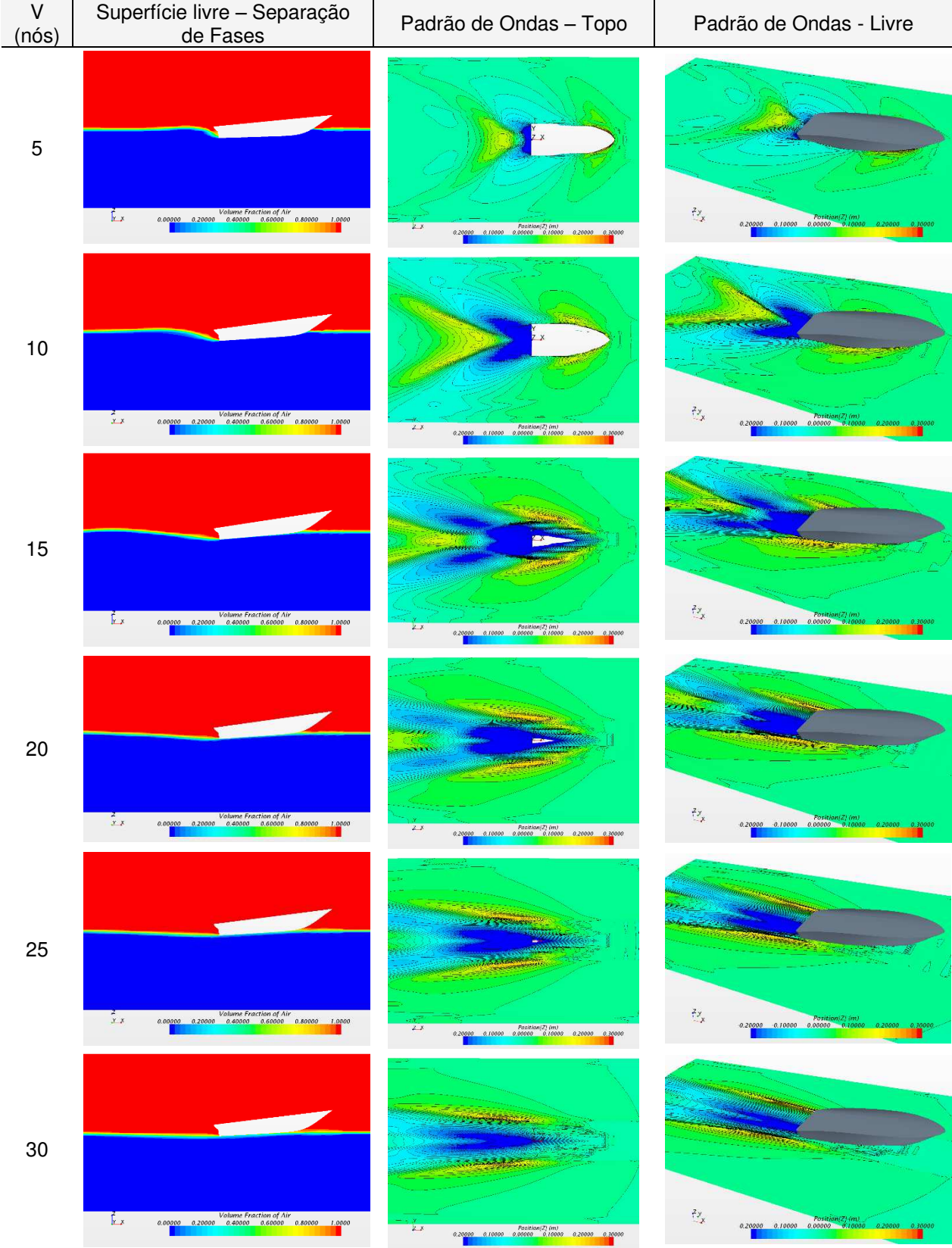
Os dados de Resistência obtidos da Figura 32 permitem concluir que, a partir de 10 nós, a resistência deixa de acompanhar exponencialmente o crescimento linear da velocidade, atingindo um patamar até aproximadamente 16 nós. O incremento de velocidade além desse ponto provoca uma diminuição da resistência total, principalmente devido à parcela de pressão. A resistência mantém-se constante até 25 nós, quando retoma a característica de crescer conforme o aumento de velocidade.

Figura 33. Curva de Potência - Série 2.

Fonte: Autor (2015).

O comportamento da curva Figura 33 condiz com o esperado de uma embarcação entrando em regime de planeio, com estabilização em pré-planeio e redução da área molhada (e volume submerso) no início do fenômeno. Após dada velocidade, a sustentação dinâmica atinge um valor máximo e a resistência ao avanço aumenta. A Tabela 6 apresenta capturas da simulação para as velocidades estudadas, e mostra o movimento de corpo rígido que ocorre durante a simulação.

Tabela 6. Captura de cenas das simulações.

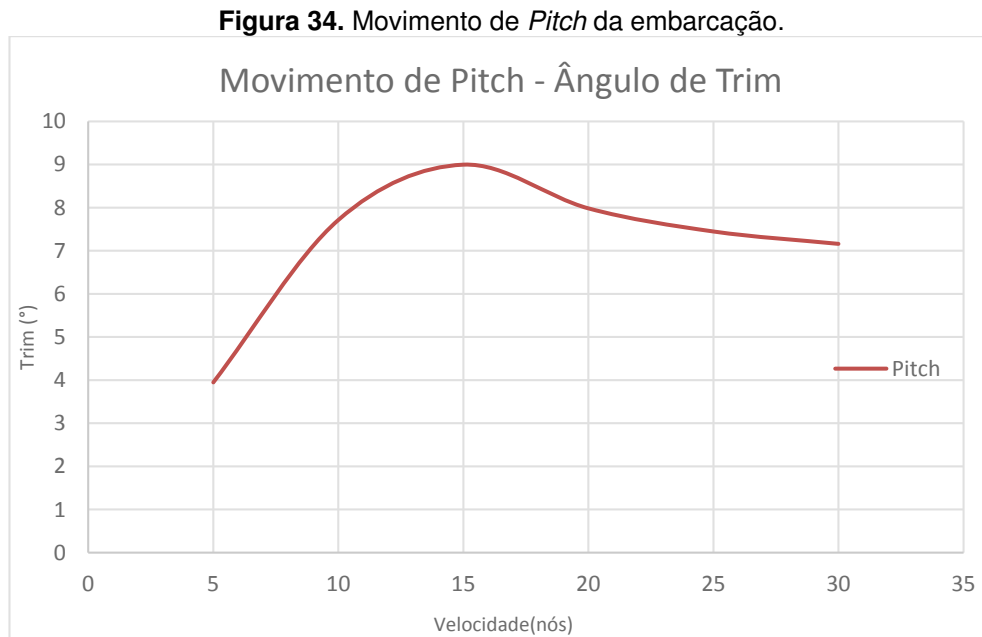


Fonte: Autor (2015).

A coluna da esquerda da Tabela 6 retrata a função de Volume de Fluido em uma vista lateral, destacando o movimento de trim da embarcação e a interação entre ar e água. Para baixas velocidades, a crista de formação de onda a ré se encontra próxima a embarcação e se distancia a medida que a velocidade aumenta.

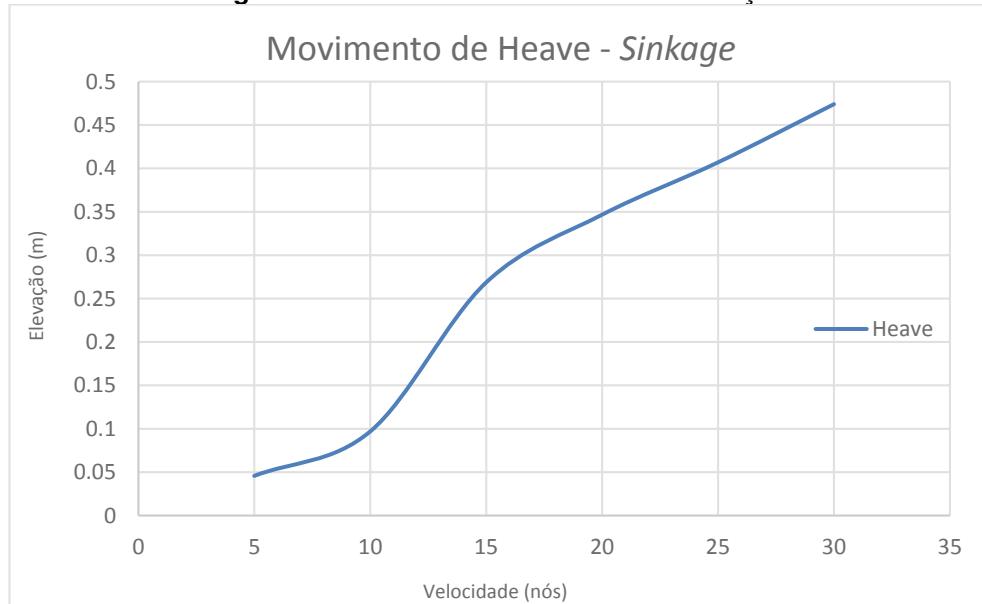
O desenvolvimento visto de cima (coluna central) incorpora a função de Posição Z da superfície da água, sem a visualização da embarcação. O aumento da velocidade da embarcação resulta em uma diminuição visual do plano de linha d'água e, conseqüentemente, na área de superfície molhada. Para valores de velocidade a partir de 20 nós em escoamento plenamente desenvolvido, na região de planeio, a função de posição exibe pouca ou nenhuma quebra na superfície – a embarcação está deslizando (apoiada) sobre a água com o mínimo de superfície molhada possível.

As Figura 34 e Figura 35 apresentam os valores dos movimentos de *heave* e *pitch* para as velocidades estudadas.



Fonte: Autor (2015).

O ângulo de trim da embarcação aumenta até atingir seu pico em 15 nós, caracterizando o auge do pré-planeio, diminuindo para velocidades maiores, quando a embarcação inicia o planeio.

Figura 35. Movimento de *Heave* da embarcação.

Fonte: Autor (2015).

A movimentação vertical da embarcação em relação à posição inicial do CG (dependendo do referencial, à linha d'água), ou *sinkage*, retrata o quanto o CG da embarcação se deslocou verticalmente. A partir de 10 nós, há um aumento significativo na taxa de elevação do CG, indicando uma aceleração alta nesse intervalo, até o pico do pré-planeio. Deste ponto em diante, a embarcação atinge o planeio desenvolvido e o CG se eleva gradativamente.

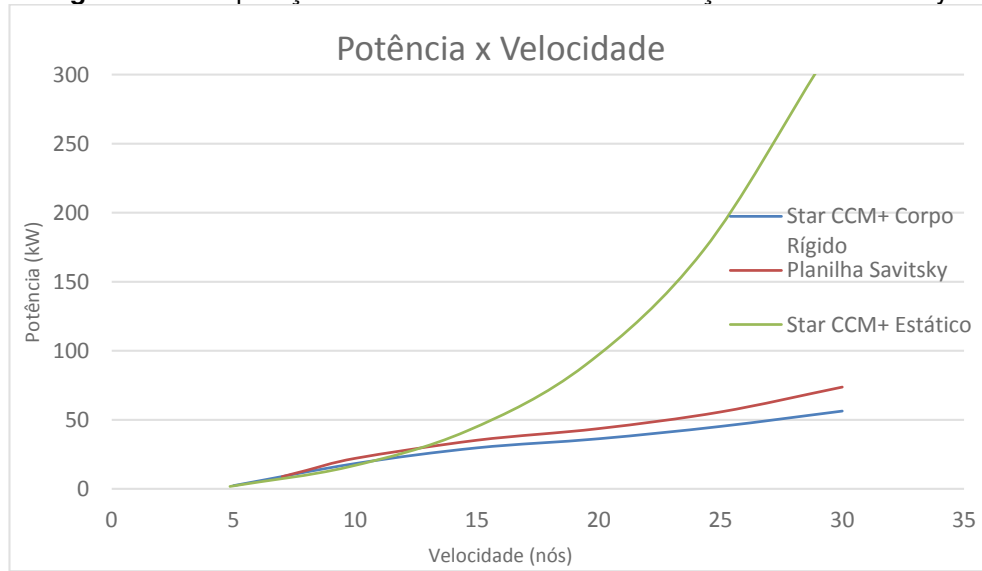
Os resultados da simulação de corpo rígido confirmam a ocorrência do fenômeno de planeio através do uso do CFD.

5.3 Comparação com resultados de Modelos Empíricos

Comparação dos resultados das simulações em CFD com os obtidos através da aplicação do método de Savitsky, no trabalho de Marin (2015).

As duas séries de simulação e Savitsky são apresentados na Figura 36.

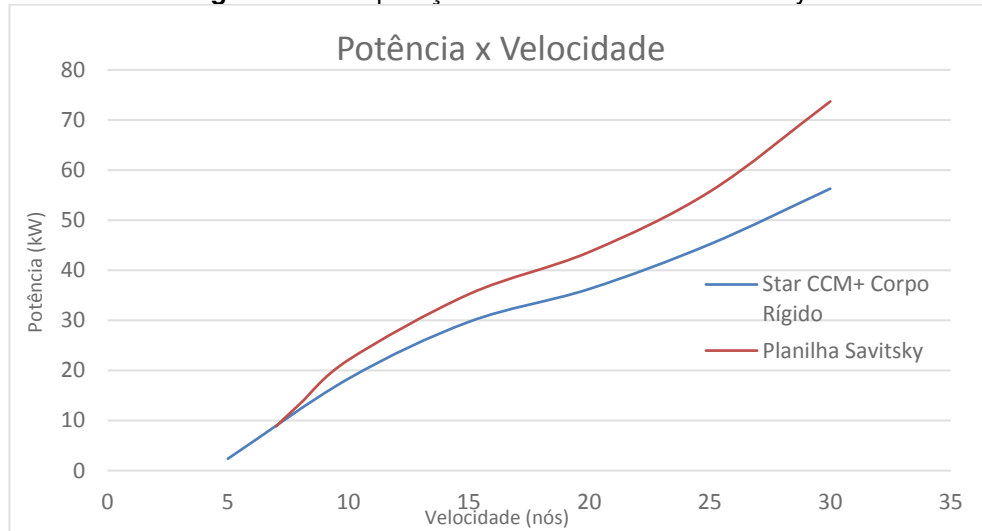
Figura 36. Comparação entre os resultados das simulações CFD e Savitsky.



Fonte: Autor (2015).

A primeira série de dados (STAR CCM+ Estático) acompanha as curvas até aproximadamente 10 nós, quando o comportamento dinâmico da embarcação se intensifica. Seu traçado então é similar ao de uma embarcação deslocante, sem sustentação dinâmica e, conseqüentemente, diminuição da área molhada, resultando em um aumento exponencial da resistência ao avanço em função da velocidade.

O perfil da curva que implementa o movimento de corpo rígido (STAR CCM+ Corpo Rígido) ficou similar a Savitsky, apresentando comportamento esperado pela embarcação, destacado na Figura 37 e Tabela 7.

Figura 37. Comparação entre CFD+DFBI e Savitsky.

Fonte: Autor (2015).

Tabela 7. Diferença entre resultados de simulação em CFD e Savitsky.

Velocidade (nós)	Potência - Savitsky (kW)	Potência - CFD (kW)	Diferença (%)
10	22.096,8	18.351,0	16.95
15	35.225,2	29.706,0	15.67
20	43.655,9	36.273,1	16.91
25	55.707,1	45.200,0	18.86
30	73.710,7	56.297,0	23.62

Fonte: Autor (2015).

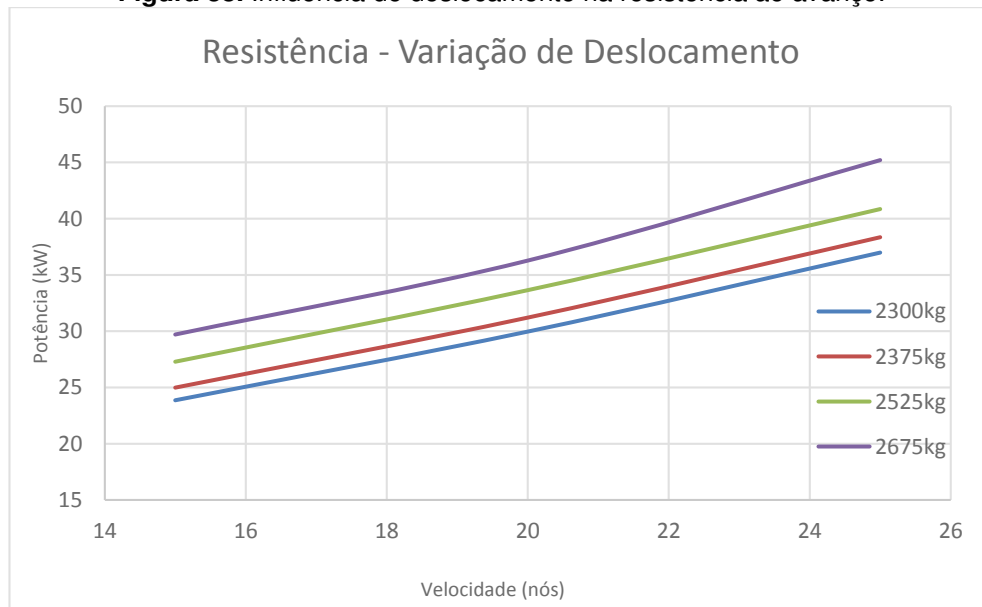
Existe uma diferença significativa de 16% a 23% entre a simulação em CFD e os dados obtidos por Savitsky, para o intervalo de velocidades que compreende o pré-planeio e planeio. Isso se deve principalmente ao estágio inicial no qual o estudo se encontra, onde as fontes de erros não foram totalmente contabilizadas e, principalmente, devido à ausência dos dados experimentais para validar os resultados encontrados.

5.4 Variações Paramétricas

As variações paramétricas têm por objetivo observar as influências de parâmetros da embarcação na resistência ao avanço do casco. Séries de simulações com variações paramétricas do LCG e do Deslocamento da embarcação são apresentadas nessa seção.

Baseado nos dados de entrada propostos pelo trabalho de Marin (2015), as diferentes situações de carregamento foram simuladas para três velocidades, 15, 20 e 25 nós, e os resultados podem ser vistos na Figura 38.

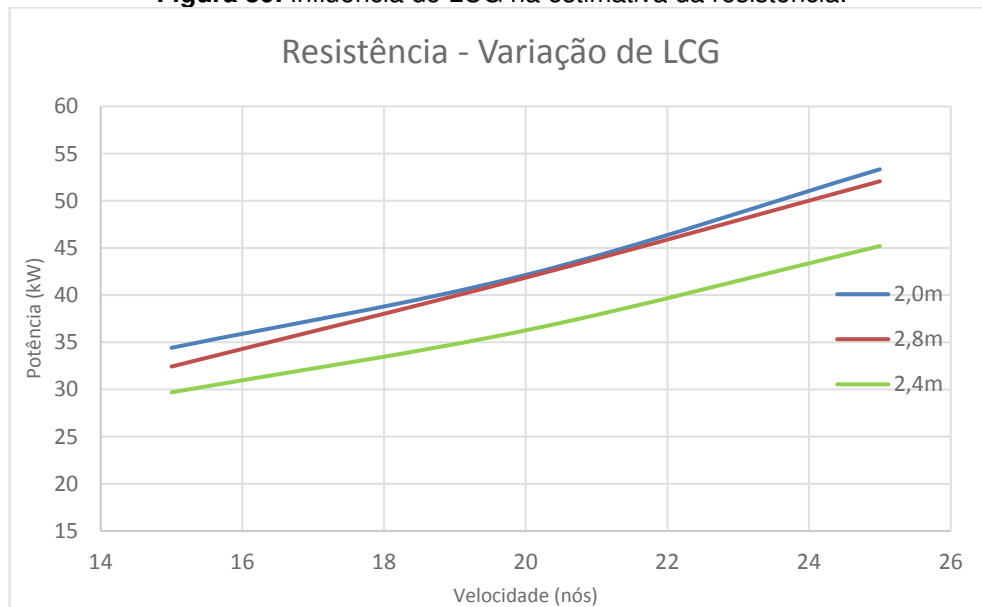
Figura 38. Influência do deslocamento na resistência ao avanço.



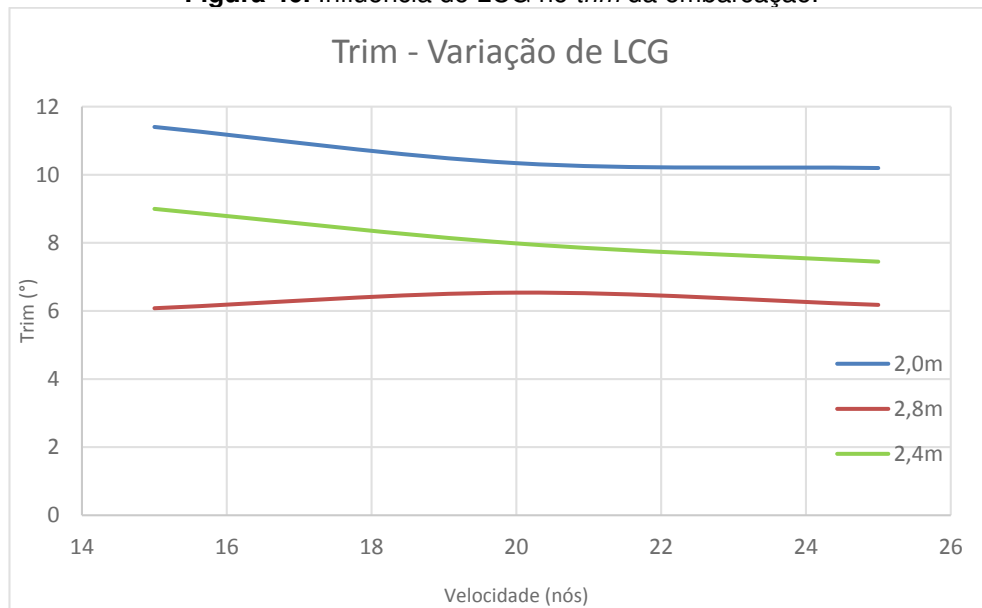
Fonte: Autor (2015).

A variação do deslocamento da embarcação mostra valores de resistência diretamente proporcionais, ou seja, quanto mais leve uma mesma embarcação for, menos resistência ela enfrentará. Considerando que um carregamento menor resulta diretamente em um calado menor e, conseqüentemente, na redução do volume submerso, esses resultados vão ao encontro do que se espera que aconteça em uma variação paramétrica do deslocamento.

Os gráficos apresentados na Figura 39 e Figura 40 mostram os resultados das simulações com variação paramétrica do LCG.

Figura 39. Influência do LCG na estimativa da resistência.

Fonte: Autor (2015).

Figura 40. Influência do LCG no *trim* da embarcação.

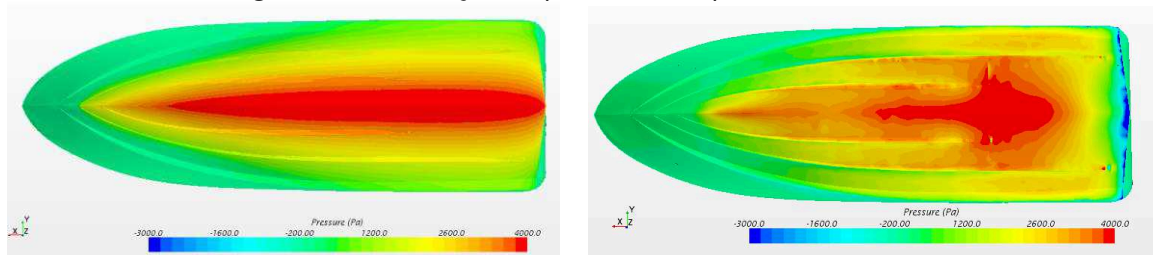
Fonte: Autor (2015).

A mudança do LCG para vante ou a ré da posição original, de 2,4m, resulta em um aumento da resistência ao avanço total estimada. O LCG deslocado a ré apresenta maior trim e, possivelmente, apresenta maior elevação do CG e atinge o planeio para velocidades mais baixas. O deslocamento do LCG a ré possibilita à embarcação uma

maior suscetibilidade às ações do fluido, visto que será maior o momento de sustentação atuado na embarcação. Isso pode provocar valores altos de aceleração vertical, ou prolongar estados de instabilidade, afetando o conforto dos tripulantes. Quando deslocado a vante, resulta em um trim menor, e apresenta um pico de semi-planeio aproximadamente em 20 nós.

A distribuição de pressão sobre o casco, Figura 41, permite confirmar o estudo sobre a ocorrência da sustentação dinâmica. À esquerda, a embarcação andando a 5 nós, angulação de trim de 4° , com uma distribuição de pressão quase uniforme sobre o fundo da embarcação. À direita, a embarcação em regime de planeio, a 35 nós.

Figura 41. Distribuição de pressão na superfície do casco.



Fonte: Autor (2015).

A concentração de pressão localiza-se principalmente no fundo a ré da embarcação, com sua linha de ação provavelmente coincidente ou oscilando muito próxima de seu CG. Destaca-se também a região de baixa pressão formada a ré da embarcação, indicando o crescimento do gradiente de pressão originado pelo aumento da velocidade. A magnitude da pressão relativa máxima encontrada na embarcação a 5 nós foi de 4.500 kPa, com pressão mínima de -1.8 kPa; enquanto no regime de planeio o valor máximo foi 7.500 kPa com mínimo de -22.500 kPa.

5.5 Incertezas

Nesta seção são discutidas as possíveis fontes de erros que podem influenciar nos resultados das simulações em CFD realizadas neste trabalho.

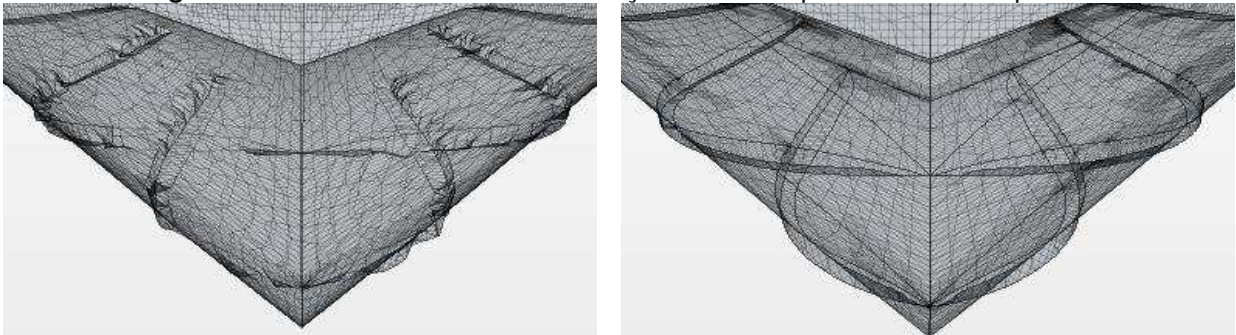
A geometria constitui a primeira fonte de erro, uma vez que é a etapa inicial do processo e desencadeará uma propagação do erro para as fases seguintes caso não

seja corrigida. Uma boa geometria deve conter o mínimo possível de irregularidades e redundância de curvas. As funções que definem suas curvas serão utilizadas posteriormente pela malha para discretizar seu domínio em 'n' domínios menores, que levam consigo irregularidades presentes na geometria.

O processo de discretização é o passo mais importante na determinação de uma solução numérica confiável. A seleção dos métodos de construção de malha, tamanho de grãos, velocidade de crescimento e critérios de qualidade têm influência direta na precisão da malha em representar a geometria.

Na Figura 42 é possível ver o resultado da mudança de parâmetros (*surface wrapper*, *contact prevention*, entre outros) na qualidade da malha. À esquerda, o casco com erros de interpretação da geometria, criando diversas zonas de descontinuidade. À direita, a malha da embarcação propriamente aplicada, com tolerâncias menores e erros minimizados.

Figura 42. Estado da malha da embarcação antes e depois de refino e reparos.



Fonte: Autor (2015).

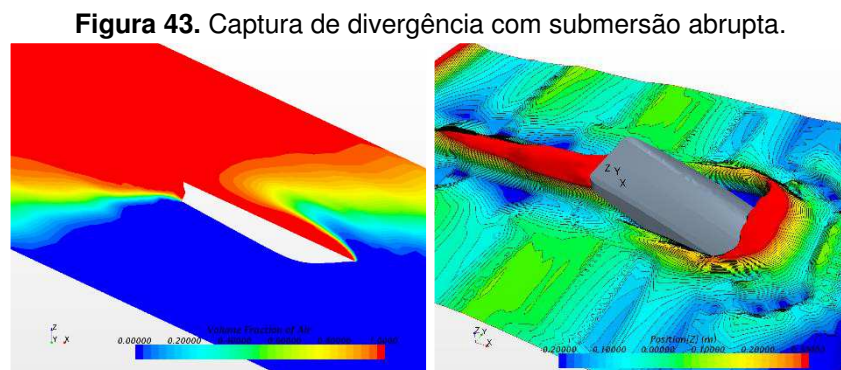
Embora a malha tenha sido construída de forma a reduzir os erros de geometria, a própria definição dela limita a precisão do estudo. Quanto maior a quantidade de células finitas presentes na malha, maior a quantidade de equações para resolver o problema numérico e, conseqüentemente, maior o esforço computacional. Desta forma, o resultado da simulação não estará isento de erro, pois para tal, seria necessário um sistema de infinitas equações, deixando de ser discreto e passando a ser contínuo, representando em todos os aspectos o fenômeno real.

O estudo contou com uma malha total de um milhão e 200 mil elementos, o que pressupõe uma precisão satisfatória de acordo com registros de simulação e

recomendações (CCTECH e Star-CCM+). Porém, esta pode ser mais refinada principalmente na região de interação casco-fluido, captando fenômenos que uma malha maior despreza.

A convergência da simulação é talvez uma das fontes mais subjetivas de incertezas, pois para cada tipo de estudo, configuração de malha ou mesmo tempo de simulação, há um critério de convergência diferente. Como a simulação é realizada no domínio do tempo, em passos geralmente muito reduzidos, a convergência busca atravessar o regime transiente e se estabelecer em um intervalo confiável, praticamente em regime permanente. Porém, diversos parâmetros da simulação, geometria e malha podem adicionar incertezas ou mesmo causar divergências. Estas ocorrem devido a, tipicamente, erros de interpretação de parâmetros ou configuração destes. Variações elevadas de variáveis em um curtíssimo espaço de tempo podem causar divergências, visto que o *software* não consegue se recuperar da perturbação excessiva e prever o comportamento do fluido a partir do ocorrido.

A seguir, algumas imagens de divergências ocorridas durante as simulações. Na Figura 43, é possível ver uma rápida submersão da embarcação, gerando uma grande alteração na malha que acompanha a superfície livre, causando divergência completa da simulação.

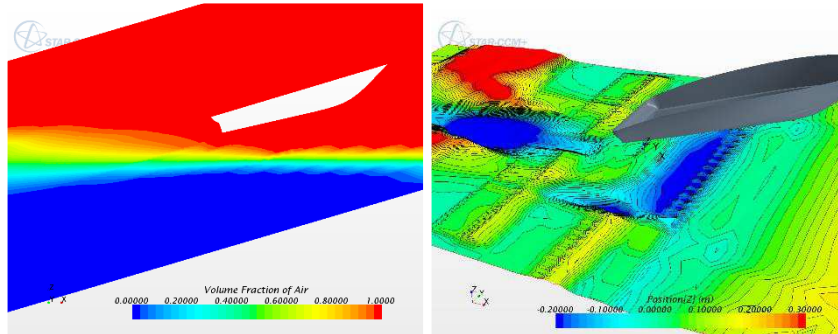


Fonte: Autor (2015).

Os parâmetros que ocasionaram a imersão abrupta, causando divergência da simulação nas etapas iniciais do uso do *software*, foram erros de inserção de dados do VCG, resultando em um movimento de *pitch* negativo. Outras ocorrências de divergência,

vide Figura 44, quando parâmetros são sub definidos ou mal interpretados pelo programa. O momento de inércia da embarcação assumiu um valor 10 vezes menor, deixando-a sujeita ao movimento em torno de seu CG com muito mais facilidade, o que proporcionou um movimento de planeio excessivo, causando divergência da solução.

Figura 44. Divergência com movimento excessivo de planeio da embarcação.



Fonte: Autor (2015).

Resultados complementares de convergência com gráficos de parâmetros residuais característicos de simulação em CFD, entre outros, estão apresentados no Apêndice C.

6 CONCLUSÃO

A dificuldade em reproduzir testes e ensaios em tanques de prova para números elevados de Froude, com o objetivo de obter similaridade hidrodinâmica, fomenta o desenvolvimento de métodos alternativos para a estimativa da resistência ao avanço de cascos planantes.

Através de séries sistemáticas e extrapolações, uma grande base de dados experimentais de embarcações foi gerada ao longo do século XX, permitindo o desenvolvimento de métodos empíricos. Estes, porém, possuem limitações e pouca aplicabilidade a cascos cuja geometria difere dos padrões disponíveis na literatura. Neste sentido, o presente trabalho se propôs, através de simulação numérica em CFD, estimar a resistência ao avanço de uma embarcação planante de 26 pés.

Os trabalhos realizados consistiram na modelagem matemática, por meio de *softwares*, do problema real. Iniciou-se com a modelagem da geometria em CAD, buscando maior similaridade com a embarcação estudada, visando a aplicação de técnicas CFD. A modelagem CFD consistiu na configuração do problema, com a criação do VC e a determinação das condições de contorno, bem como a discretização do ambiente, separando-o em elementos finitos. Por fim, os critérios de convergência e parâmetros da simulação foram estabelecidos.

O movimento de corpo rígido da embarcação foi inserido e novas simulações foram realizadas. Os resultados obtidos nas simulações foram comparados com o método empírico de Savitsky (1964) descrito no trabalho de Marin (2015). As simulações onde a embarcação foi considerada fixa, apresentaram valores próximos aos de Savitsky para velocidades abaixo de 10 nós, enquanto a embarcação ainda possui comportamento deslocante. Para velocidades acima desse valor, a resistência obtida por CFD sobe exponencialmente com o crescimento da velocidade.

A série de simulações que contemplou o movimento de corpo rígido apresentou comportamento que comprova a ocorrência do fenômeno de planeio. Comparado com Savitsky, apresentou valores entre 16 e 23% abaixo do método empírico.

A avaliação da discrepância entre os métodos poderá ser avaliada com realização de testes experimentais do modelo em escala da embarcação.

Os resultados obtidos através das variações paramétricas (LCG e deslocamento) permitem concluir que o aumento do deslocamento influencia diretamente no aumento da resistência ao avanço. Diferentemente, o LCG possui uma posição ótima, e seu reposicionamento tanto a vante quanto a ré desta posição ocasiona um aumento da resistência ao avanço total da embarcação.

Os objetivos parciais estipulados para esse trabalho foram cumpridos, mas sua relevância para a solução do problema proposto pode ser melhor avaliada com a realização de trabalhos experimentais futuros.

É recomendado realizar um estudo mais profundo das fontes de incerteza específicas das simulações em CFD, quantificando-as. Com a utilização de clusters para realização de simulação, malhas mais finas poderão ser usadas e resultados com precisão maior serão obtidos. Em séries futuras de simulação, mais pontos devem ser simulados para diminuir os erros presentes no comportamento da curva, que atualmente realiza aproximações para a interpolação dos pontos. Uma ampliação do VC proporcionará uma avaliação dos padrões de ondas gerados pela embarcação, enriquecendo o estudo. Por fim, a realização deste trabalho é o passo inicial dado no sentido de prever com precisão o comportamento de uma embarcação em regime de planeio, utilizando simulação numérica em CFD e considerando o movimento de corpo rígido da embarcação.

REFERÊNCIAS

ALMETER, J. M. **Resistance Prediction of Planing Hulls: State of the Art**. Marine Technology, Vol. 30, No. 4, 1993.

ANSYS® **User Guide**. ANSYS, 2015.

BAIRD, N. **The World Fast Ferry Market**. Melbourne, Australia: Baird Publications 1998.

BERTRAM, V. **Practical Ship Hydrodynamics**. Butterworth-Heinemann. Grã Bretanha, 2000

BOAT GUIDE. <http://www.guideautoweb.com/boat/makes/donzi/zr/38_zr_competiton/>. Acesso em Nov. de 2014.

CCTECH - Multiphase Flow Modeling Using ANSYS FLUENT. Curso Online. Acesso em Out. 2015.

FALTINSEN, O. M. **Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles**. New York: Editora Cambridge, 2005.

HAMIDON, E.; MAHAMAD, F. B.; AS'SHAAR, M. F. B. **Smk4562 [Small Craft Technology]**. Trabalho Acadêmico. Faculty of Mechanical Engineering - Universiti Teknologi Malaysia. Malásia, 2009/2010.

HINRICHSSEN, P. F. **Bifilar Suspension Measurement of Boat Inertia Parameters**. Journal of Sailboat Technology, 2014-1.

IGNÁCIO, R. F. **Curso Básico de Mecânica dos Fluidos**. Fesurv, 2004.

International Towing Tank Conference. 8ª edição. Madri, Espanha, 1957.

International Towing Tank Conference. 15ª edição. The Hague, Holanda, 1978.

JORNAL DA MADEIRA. <<http://www.jornaldamadeira.pt/artigos/lancha-de-salvamento-mar%C3%ADtimo-socorre-n%C3%A1ufragos-de-barco-de-recreio-nos-mares-da-madeira>>. Português. Acesso em Nov. de 2014.

KELVIN, LORD. **Ship Waves**. Transactions of IME. Londres, 1887.

KUKNER, A.; YASA, A. M. **High Speed Planing Hulls Resistance Prediction Methods and Comparison**. Trabalho acadêmico, Istanbul Technical University. Turquia, s.d.

LANGAN, J. F. **The Continuity Equation, the Reynolds Number, the Froude Number**. Disponível em: < <http://www.yale.edu/ynhti/curriculum/units/1988/6/88.06.04.x.html>>. Acesso em Nov. 2015.

LEDUCQ, C. L.; TEODORO, C. R. O.; SILVESTRE, L. F.; HASHIBA, R. I. **Estudo analítico/experimental do desempenho de dois cascos de lancha do tipo offshore**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

LARSSON, L.; BABA, E. **Ship resistance and flow computations**. Advances in marine Hydrodynamics, M. Ohkusu (ed.), Comp. Mech. Publ., pp. 1–75, 1996.

LEWIS, E. V. (Editor). **Principles of Naval Architecture**. 2 ed. Cidade de Jersey, 1988.

MARIN, G. **Estudo Paramétrico de Resistência ao Avanço: Análise Método de Savitsky**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

MOLLAND, A. F.; TURNOCK, S. R.; HUDSON, D. A. **Ship Resistance and Propulsion**. University of Southampton. Cambridge University Press. Cambridge, 2011.

MORTON, K.W.; MAYERS, D.F. **Numerical Solution of Partial Differential Equations, an Introduction**. Cambridge University Press. Londres, 2005.

NAKANISHI, H. C.; PALHARES, F. L.; ANDRADE, B. L. R.; TANCREDI, T. P. Procedimento de otimização aplicado ao projeto de embarcações de planeio. 24º **Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore. SOBENA 2012**. Rio de Janeiro, 2012.

PICANCO, H. P. **Uma aplicação de Dinâmica dos Fluidos Computacional**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1999.

REMIE, J. <<http://catholicscienceteacher7.blogspot.com.br/2013/12/density-buoyancy.html>>. Acesso em Nov. de 2014.

RIBEIRO, H. J. C. **Equilíbrio Dinâmico de Cascos Planadores**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.

SAMPAIO, C. M.; UMEDA, C. H.; MIWA, I. Avaliação experimental do efeito de atletas de popa no desempenho hidrodinâmico de embarcações rápidas. In: **XIX COPINAVAL**. Guayaquil, Equador, 2005.

SAVITSKY, D. **Hydrodynamic Design of Planing Hulls**. Marine Technology, Vol. 1, No 1. New Jersey, 1964.

SAVITSKY, D.; BROWN, P. W. **Procedures for Hydrodynamics Evaluation of Planing Hulls in Smooth and Rough Water**. New Jersey. Marine Technology – Davidson Laboratory, 1976.

SAVITSKY, D.; DELORME, M. F.; DATLA, R. **Inclusion of Whisker Spray Drag in Performance Prediction Method for High-Speed Planing Hulls**. New Jersey. Marine Technology, 2007.

SHIP STRUCTURE COMMITTEE. **Comparative Structural Requirements for High Speed Crafts - SSC-439**. 2005.

SILVA, Leonardo. <<http://www.planobrazil.com/engenheiros-de-estaleiro-sueco-visitam-a-base-naval-de-val-de-caes/>>. Acesso em Nov. de 2014.

STAR-CCM+® **User Guide**. CD-ADAPCO, 2015.

TRINDADE, J. **Hidrodinâmica e Propulsão**: Engenharia de Máquinas Marítimas. ENIDH, 2012.

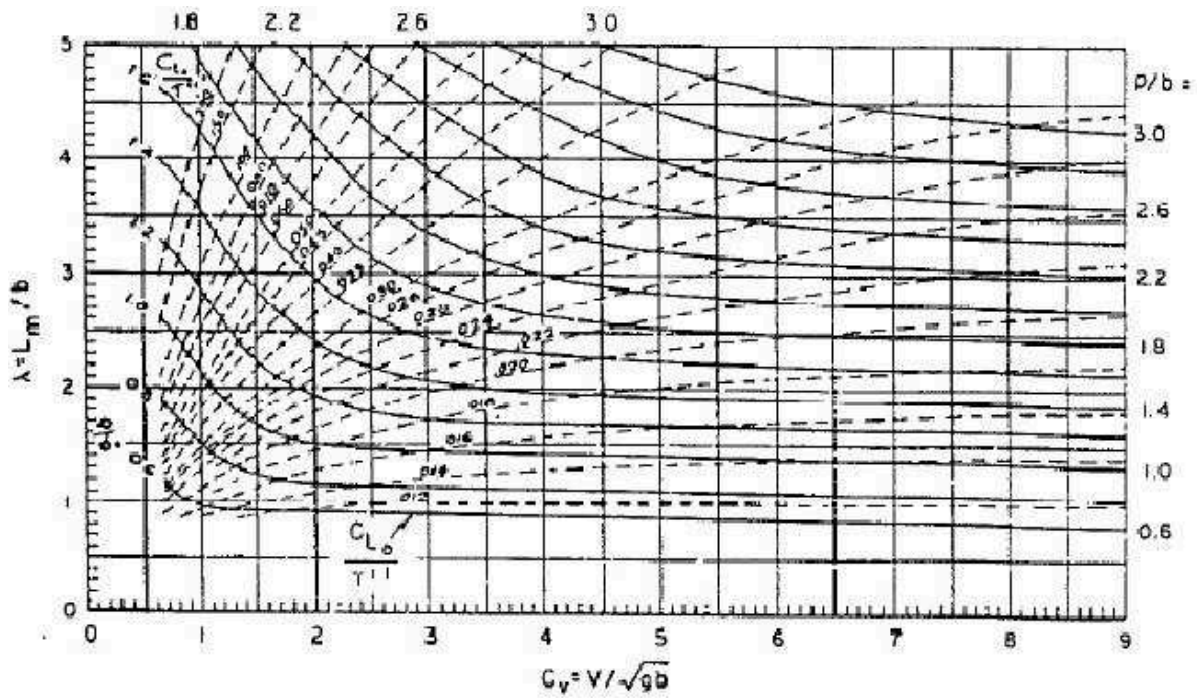
WELLS, D. A. **Lagrangian Dynamics. Schaum Series.** McGraw-Hill, New York, 1967.

WENDT, J. F.; ANDERSON, J. D. Jr. **Computational Fluid Dynamics – an Introduction.** Springer-Verlag: 3a Ed. Berlin, 2009.

ZHANG, J. **Naval Architecture.** Apresentação. Disponível em: <
<https://ceprofs.civil.tamu.edu/jzhang/oe201class/Naval-architecture.ppt>>. Acesso em
Nov. 2015.

APÊNDICE A – MÉTODO DE SAVITSKY

Figura 1. Gráfico (*numograph*) para obtenção de valores de λ e $Clb/\tau^{1,1}$.



Fonte: Savitsky (1964) apud Hamidon et al (2010).

APÊNDICE B – Ambiente de simulação do STAR-CCM+

Figura 1. Plano de linhas utilizado para construção do casco em CAD – vista frontal (LEDUCQ et al, 2013).

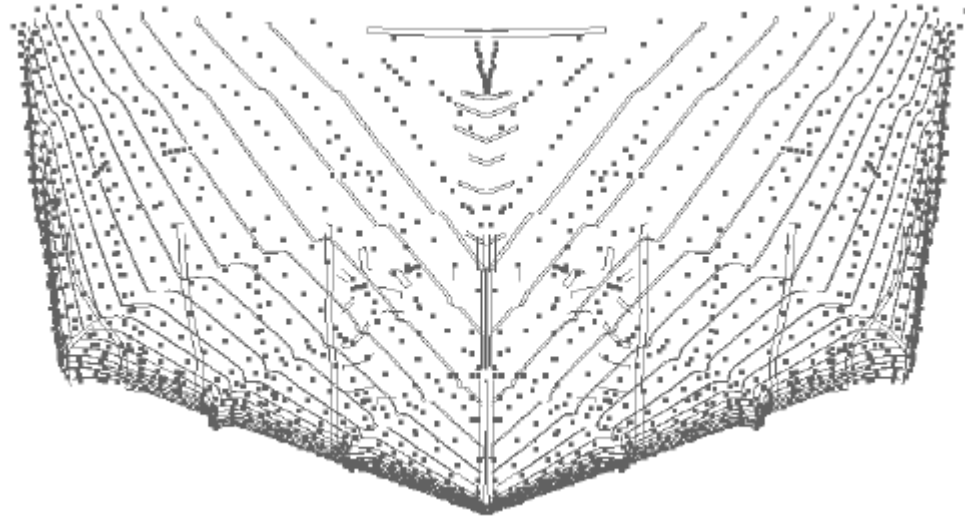


Figura 2. Vista lateral das linhas de construção do casco. (LEDUCQ et al, 2013).

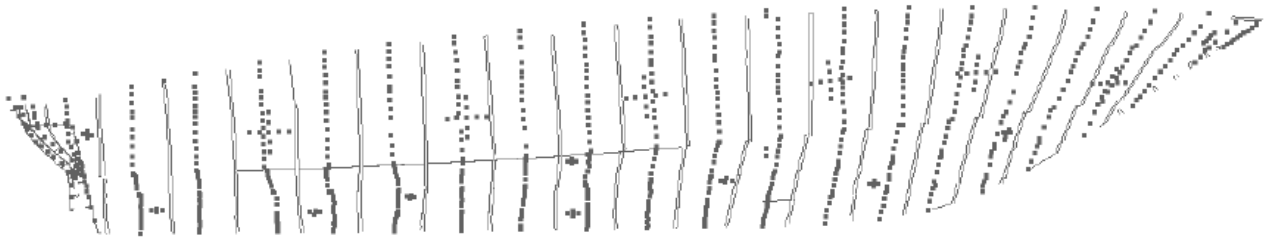


Figura 3. Geometria do casco separada em superfícies.

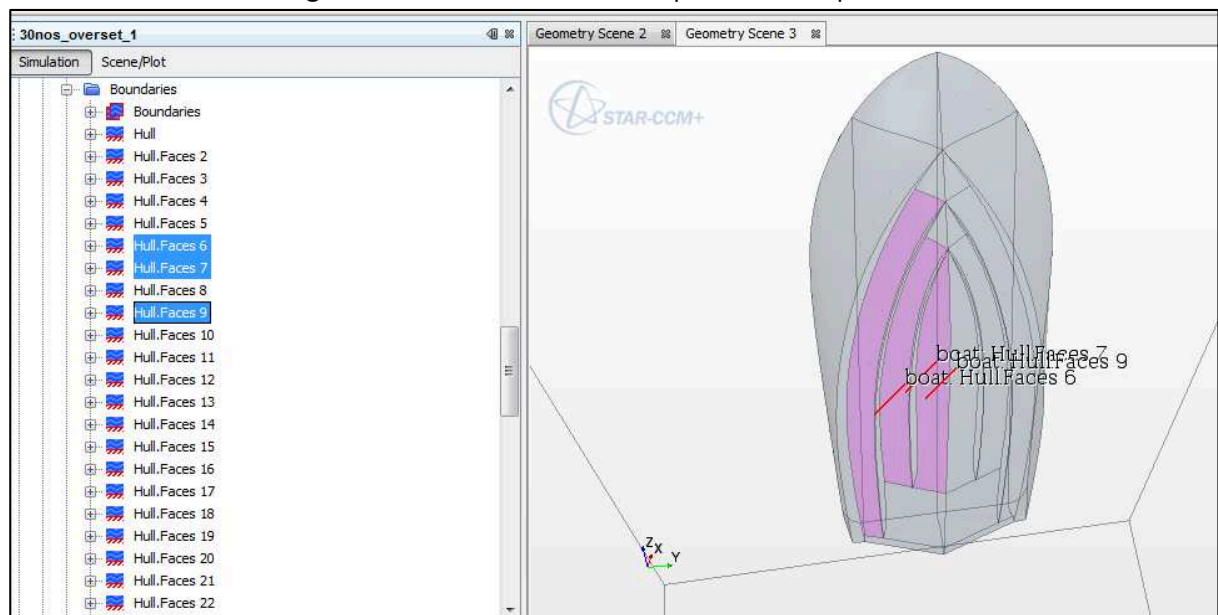


Figura 4. Controles de malha.

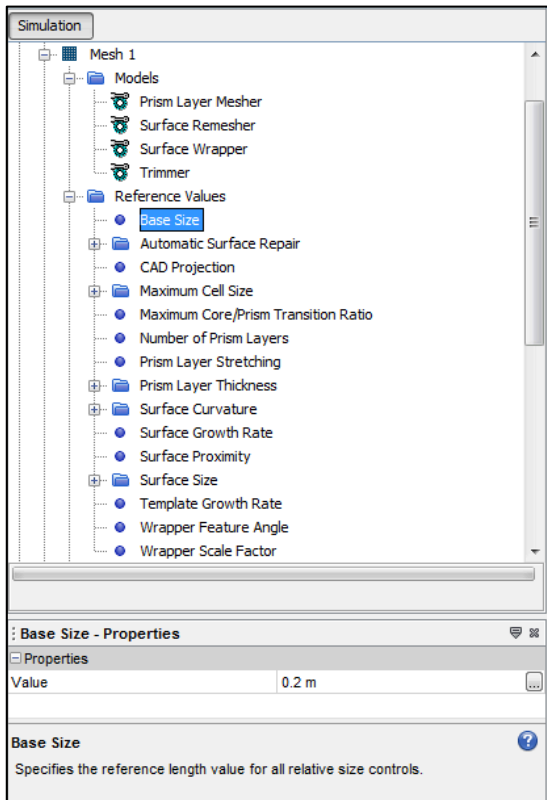


Figura 6. Dados de inércia da embarcação.

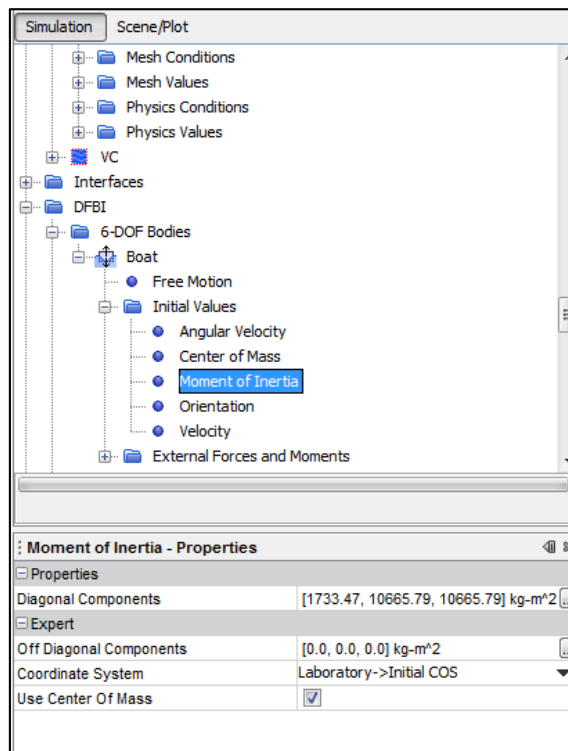


Figura 5. Modelos matemáticos.

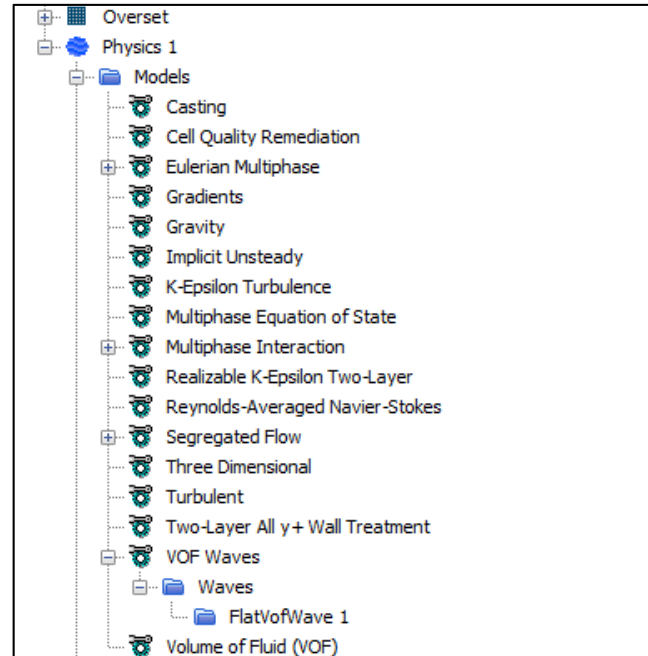
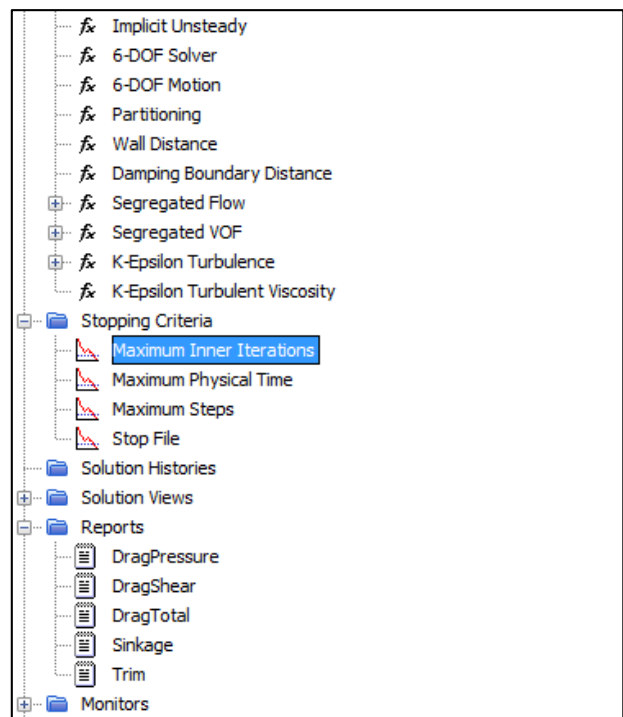


Figura 7. Solvers, Critérios de simulação e relatórios de dados.



APÊNDICE C – Resultados Complementares

Esta seção visa reunir os resultados complementares obtidos através da etapa de pós processamento da simulação. Os parâmetros foram variados a fim de fornecer a melhor ilustração do escoamento e fenômeno de planeio.

Figura 1. Distribuição de pressão do escoamento.

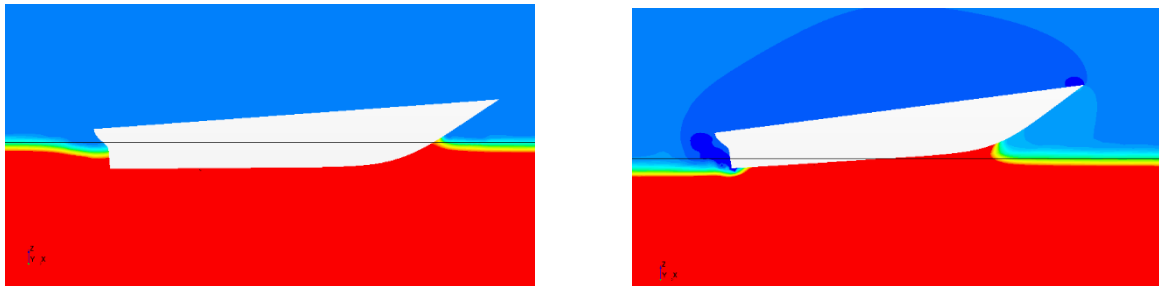
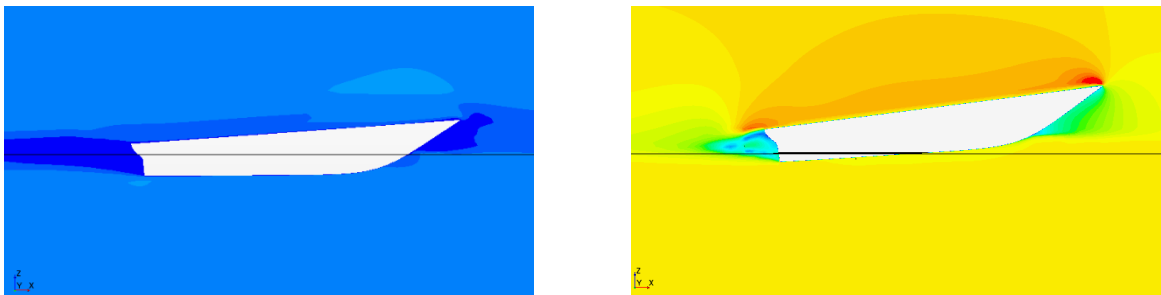


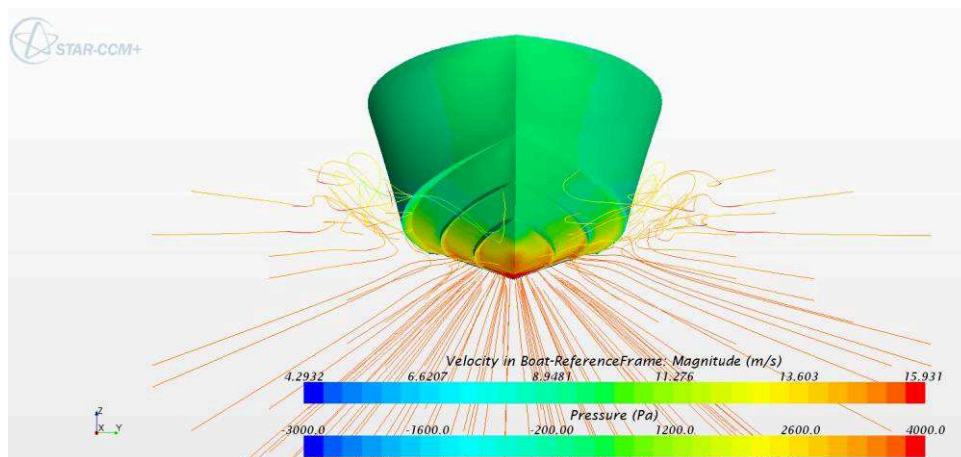
Figura 2. Velocidade do escoamento nos entornos da embarcação.



5 nós

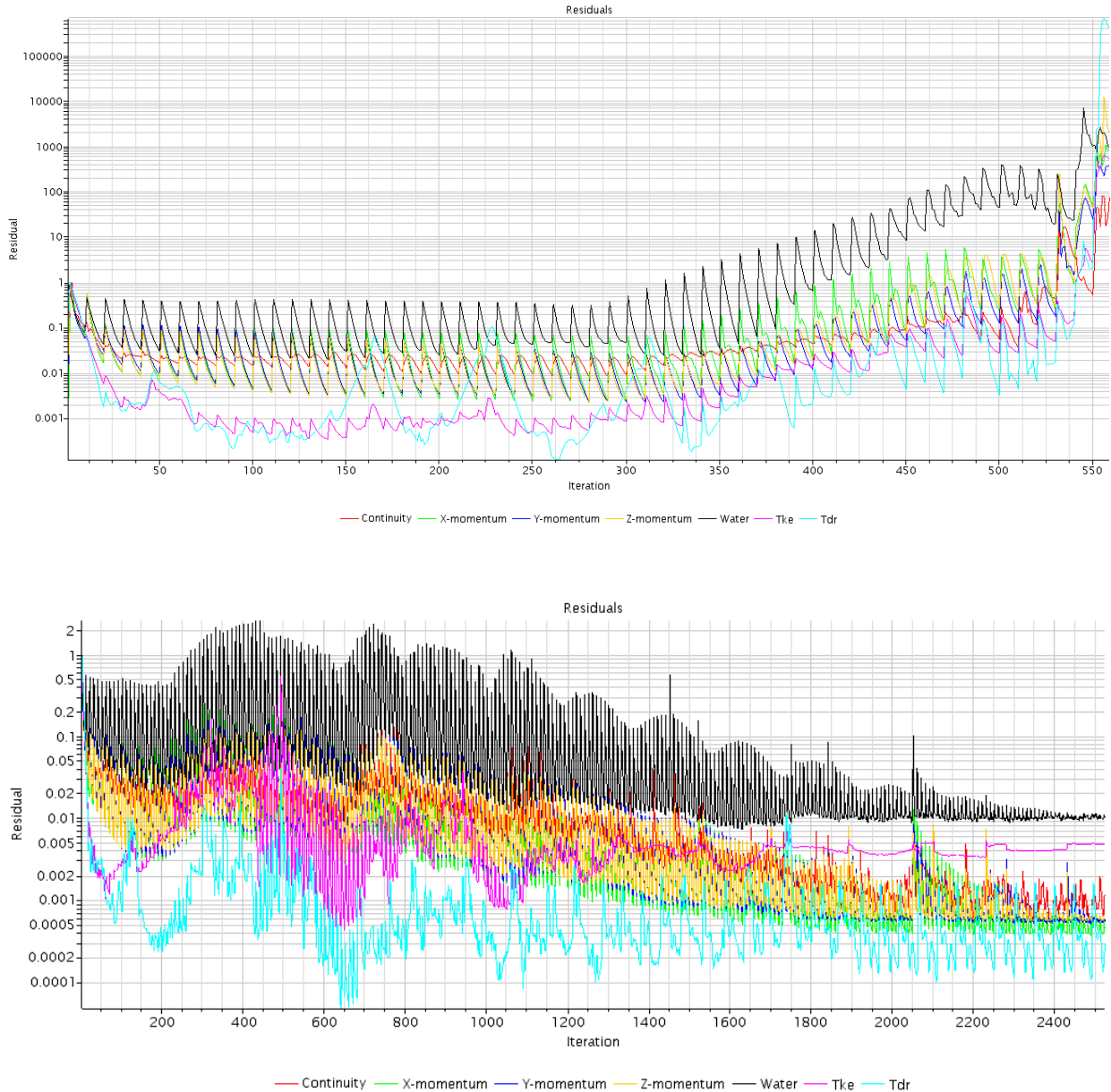
30 nós

Figura 3. Linhas de corrente contornando o casco (30 nós).



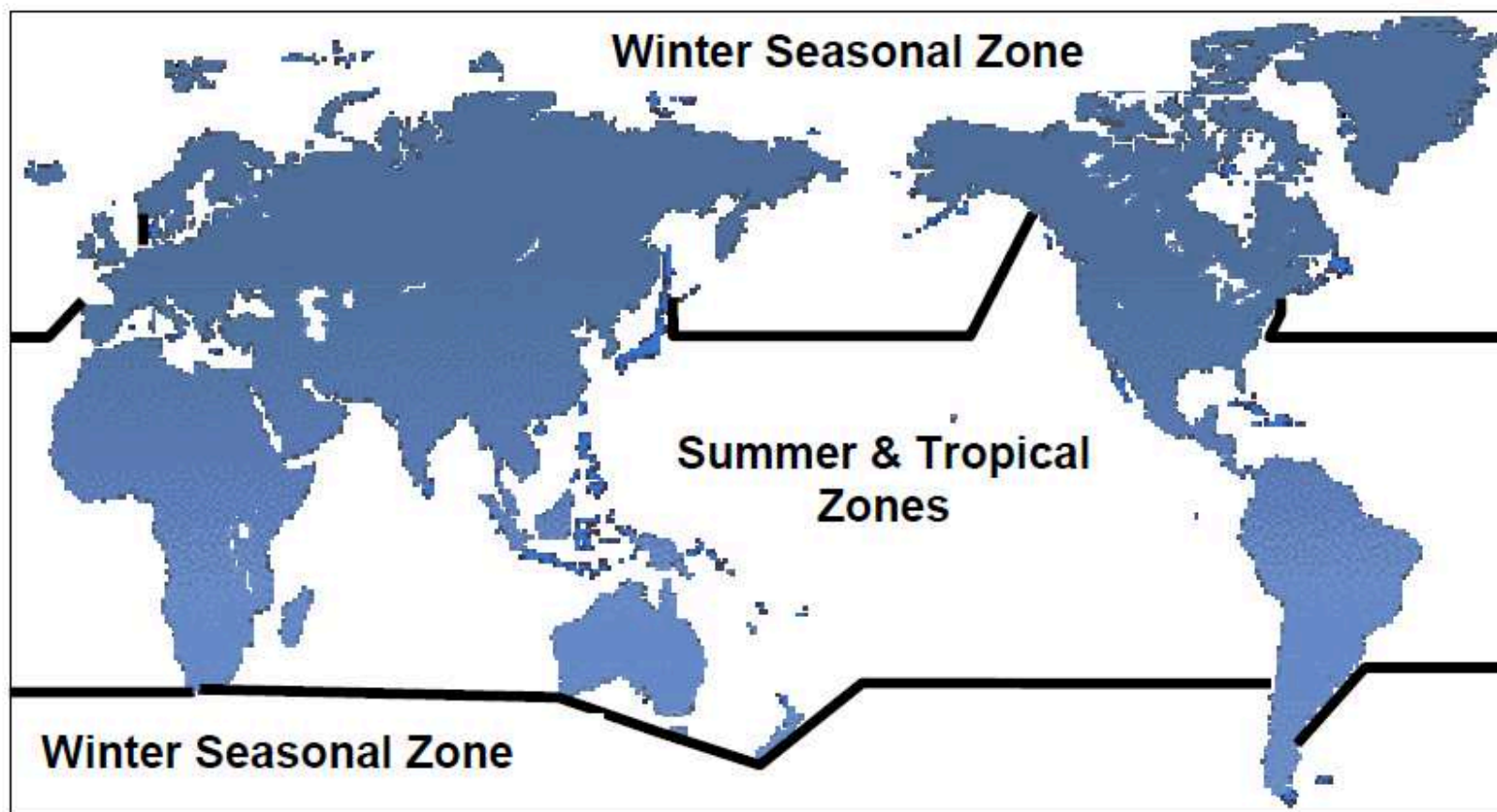
Cada equação de conservação terá seu valor de resíduo calculado a cada iteração, até atingir uma oscilação dentro do limite desejado, convergindo para um valor.

Figura 4. Comparação entre critérios convergência de diferentes simulações por análise dos resíduos. (Acima) Simulação apresentando divergência após 550 iterações. (Abaixo) Simulação com convergência após 2500 iterações.



ANEXO A – MAPA DE ZONAS SASONAIS

Zonas, áreas e períodos sazonais definidos pela *International Conference on Load Lines* (1966).



Fonte: Ship Structure Committee (2005)